В. В. НЕЧАЕВ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «РЕЧНОЙ ТРАНСПОРТ»
МОСКВА - 1957

В. В. НЕЧАЕВ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Под редакцией
канд. техн. наук Б. И. БОГОРАДА

*Рекомендовано*
*Управлением учебных заведений МРФ*
*в качестве учебного пособия*
*для учащихся речных училищ и техникумов*

ИЗДАТЕЛЬСТВО «РЕЧНОЙ ТРАНСПОРТ»
Москва — 1957

Настоящее учебное пособие написано по программе электромеханической специальности речных училищ и техникумов, где изучение электрических машин является самостоятельным предметом.

В книге изложены теоретические основы электрических машин постоянного и переменного тока. В ней рассмотрены генераторы и двигатели постоянного тока, синхронные генераторы, синхронные двигатели, асинхронные двигатели, трансформаторы, их принцип действия и устройство. В соответствии с программой отдельным разделом даны преобразователи электрического тока.

Книга может быть использована также учащимися других специальностей при изучении соответствующего раздела электротехники.

Рецензенты

*САБАНЕЕВ И. А.* и *НИКОЛАЕВ С. А.*

Оформление переплета художника Иванова И. И.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Речной транспорт непрерывно пополняется новыми судами, оснащенными современной техникой и отвечающими условиям судоходства на реконструируемых водных магистралях.

XX съезд Коммунистической партии Советского Союза наметил дальнейшие пути развития речного транспорта, грузооборот которого должен увеличиться примерно на 80 процентов. Речной флот должен пополниться судами с повышенными скоростями. Мощность буксирных и самоходных судов за пятилетие должна возрасти на 720 тыс. *л.с.*, а пассажирских судов — на 180 тыс. *л.с.*

Растет число электрифицированных судов. Электрический привод становится основным видом привода судовых механизмов.

Если до 1950 г. на подавляющем большинстве судов преобладал постоянный ток в силу ряда эксплуатационных преимуществ электрических машин постоянного тока, то за последние годы на судах речного флота равные права начинает получать переменный ток, и трехфазные асинхронные двигатели применяются в схемах электрических приводов ответственных судовых механизмов.

В связи с указанным особое значение приобретает подготовка квалифицированных электротехнических кадров для речного транспорта.

Настоящее учебное пособие предназначается для электромеханических отделений речных училищ и техникумов, где изучение электрических машин является самостоятельным предметом.

В книге излагаются теоретические основы по электрическим машинам как постоянного, так и переменного тока. В ней рассмотрены принципы действия и устройство машин постоянного тока, синхронных машин, асинхронных двигателей, трансформаторов и преобразователей. Требования, предъявляемые к электрическим машинам, устанавливаемым на судах, изложены в соответствии с

Правилами «По электрооборудованию судов внутреннего плавания СССР (реки, озера, каналы)» Речного Регистра СССР (Речиздат, 1953 г.).

Данное учебное пособие может быть использовано также при изучении электрических машин на отделениях других специальностей речных училищ и техникумов, где этот предмет не выделен в самостоятельный курс.

В процессе подготовки книги к изданию ценные замечания были сделаны со стороны преподавателей Щербаковского речного техникума, которым автор выражает свою благодарность.

Особую благодарность автор считает своим долгом выразить канд. техн. наук Б. И. Богораду за ту большую работу, которая была им проделана по редактированию книги.

*Автор*

# *Раздел первый*

# МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## *Глава I*

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ПРИНЦИП ИХ ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО

### § 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрическими машинами называются машины, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую (электрические генераторы) и электрической энергии в механическую (электрические двигатели).

Историю развития электрических машин можно условно подразделить на четыре периода.

Первый период (1822—1834 гг.) был периодом, когда ряд иностранных и русских ученых проводил работы по преобразованию электрической энергии в механическую.

Здесь в первую очередь необходимо упомянуть работы английского физика Фарадея, создавшего в 1822 г. первый электрический двигатель «двигатель Фарадея». Этот «двигатель» представлял собой проводник, опиравшийся на острие магнита и поворачивавшийся на оси при пропускании по цепи электрического тока. На этой модели впервые было показано, что в результате взаимодействия основного магнитного поля с проводником, по которому протекает электрический ток, создается момент сил, поворачивающий проводник.

В 1831 г. Фарадеем был открыт закон электромагнитной индукции и создан «диск Фарадея», по существу это была первая модель генератора постоянного тока.

В 1833 г. была опубликована работа русского академика Э. Х. Ленца, в которой он сформулировал закон электромагнитной индукции и вывел закон, известный под названием «закон Ленца», явившийся доказательством общности явлений, происходящих в двигателях и генераторах постоянного тока.

Второй период (1834—1863 гг.) был периодом создания первых годных для практического применения электрических ма-

шин постоянного тока и накопления теоретических обоснований процессов, происходящих в них.

В 30 годах XIX в. делались многочисленные попытки создания электрических двигателей с возвратно-поступательным движением (рис. 1). При пропускании электрического тока по катушкам соленоидов их сердечники при каждом изменении направления тока (перемене полярности) попеременно втягивались внутрь соленоидов и сообщали раме возвратно-поступательное движение, которое при помощи кривошипно-шатунного механизма преобразовывалось во вращательное движение маховика.

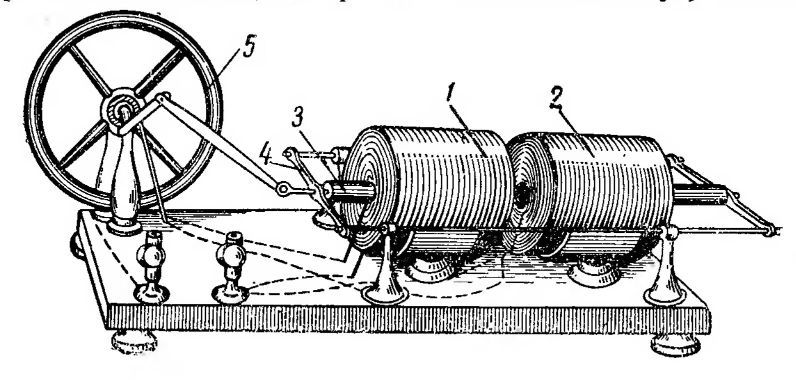



**Рис. 1. Двигатель с возвратно-поступательным движением:**
*1* и *2*—катушки соленоидов; *3*—сердечники; *4*—рама; *5*—маховик

Первый электрический двигатель, пригодный для практического использования, был создан русским ученым академиком Б. С. Якоби в 1834 г. Этот двигатель постоянного тока (рис. 2) имел вращающийся вал, на котором находилось восемь электромагнитов. Другие восемь электромагнитов были укреплены на неподвижной деревянной раме. При включении тока в результате взаимодействия электромагнитов вал с укрепленными на нем подвижными электромагнитами поворачивался на некоторый угол. На оси барабана имелось специальное устройство — коммутатор, при помощи которого менялась полярность тока при повороте вала. Вследствие этого между электромагнитами все время получалось притягивающее или

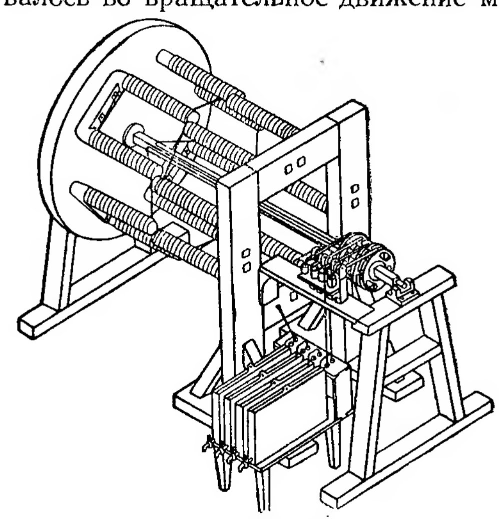


Рис. 2. Двигатель Якоби

отталкивающее взаимодействие и возникало вращательное движение в определенном направлении.

Более мощный двигатель с другим расположением электромагнитов был установлен Б. С. Якоби в 1838 г. в лодке и использован для приведения в действие гребных колес. Такая лодка подвергалась испытанию на р. Неве. Она перемещалась со скоростью 1,5 узла, имея на борту тринадцать пассажиров. Это был первый в мире речной электроход.

Дальнейшие работы русских и иностранных ученых были направлены на усовершенствование электрических двигателей с вращательным движением. Был сделан целый ряд ценнейших изобретений, таких как замена постоянных магнитов электромагнитами (1851 г. Синстеден и независимо от него в 1863 г. — Уайльд), открытие принципа самовозбуждения генераторов (1851 г. Хиорт и ряд других), создание генератора со смешанным возбуждением (1867 г. Верлей), создание кольцевого якоря с замкнутой спиральной обмоткой, присоединенной к коллектору (1860 г. Пачинотти).

Третий период (1863—1885 гг.) был периодом быстрого усовершенствования и широкого внедрения в практику электрических машин. В этот период были созданы основы расчета электрических машин.

До 1870 г. электрические двигатели получали энергию от химических источников тока, генераторы и двигатели развивались самостоятельно. Лишь с 1870 г. был полностью понят принцип обратимости электрических машин, и электрические двигатели стали питаться от электрических генераторов.

С 1870 по 1885 гг. электрические машины совершенствовались без разделения на генераторы и двигатели и постепенно начали приобретать современное конструктивное оформление.

В 1871 г. Граммом был создан кольцевой якорь с сердечником из стальной проволоки для ослабления действия вихревых токов.

В 1876 г. П. Н. Яблочковым была предложена конструкция барабанного якоря, а в 1882—1883 гг. были созданы основные типы однослойных и двухслойных обмоток многополюсных машин (Гефнер-Альтенек, Вестон, Перри, Мерон и Кинод).

В 1884—1885 гг. для ослабления влияния реакции якоря и улучшения условий коммутации были предложены добавочные полюсы и компенсационные обмотки (Менгес и Метер).

В 1885 г. медные щетки были заменены угольными (Форбс и Тюри).

В этот же период (1872 г.) В. Н. Чиколев создал первый электрический привод (электрифицированная швейная машина).

Огромное значение для конструирования и развития электрических машин имели работы по исследованию явлений намагничивания стали, проведенные А. Г. Столетовым. В 1871 г. он установил основные принципы расчета магнитных цепей и положил начало теории ферромагнетизма.

Четвертый период (1885—1891 гг.) был периодом развития переменного тока и создания основных типов машин трехфазного переменного тока.

Еще в 1877 г. П. Н. Яблочков (1847—1894) применил переменный ток и использовал принцип трансформации для питания созданных им электрических дуговых источников света — «свеча Яблочкова». В 1883—1885 гг. был открыт принцип вращающегося магнитного поля (Дейре, Феррарис, Тесла).

Настоящую революцию в развитии электрических машин произвел русский инженер М. О. Доливо-Добровольский (1862—1919), который в 1889 г. изобрел трехфазный асинхронный электрический двигатель с короткозамкнутым ротором, а в 1890—1891 гг. создал остальные основные типы электрических машин трехфазного переменного тока — синхронный генератор и трансформатор.

Начиная с 1891—1892 гг. ведутся работы по дальнейшей разработке теории электрических машин, совершенствованию их конструкций, улучшению и созданию новых электротехнических материалов.

Большой вклад в развитие электромашиностроения в нашей стране внесли в области теории электромагнитных явлений Б. А. Введенский, В. К. Аркадьев, Н. С. Акулов, В. Ф. Миткевич, К. А. Круг, в теорию электрических машин А. А. Воронов, К. И. Шенфер, М. П. Костенко, В. А. Толвинский и многие другие.

Советское машиностроение добилось огромных успехов в создании новых типов электрических двигателей и генераторов.

Отечественной промышленностью выпускаются электрические двигатели постоянного и переменного тока с очень широким диапазоном мощностей (от нескольких десятков ватт до нескольких тысяч киловатт). Создана единая серия асинхронных электрических двигателей.

Особенно велики успехи в области генераторостроения и трансформаторостроения. Ленинградским заводом «Электросила» освоено производство гидрогенераторов единичной мощностью 105 тыс. *квт* для Куйбышевской ГЭС. Кроме того, ведутся работы по созданию гидротурбинных генераторов единичной мощностью до 300 тыс. *квт*.

XX съездом КПСС перед советскими энергетиками поставлены ответственные задачи по освоению производства нового энергетического оборудования на высокие параметры пара с комплексной автоматизацией работы паровых турбин, котлов и другого оборудования электростанций. В шестой пятилетке должны быть разработаны конструкции и освоен выпуск паровых турбин мощностью 200 и 300 тыс. *квт* и котлов к ним, крупных генераторов к паровым турбинам мощностью до 300 тыс. *квт* со специальным охлаждением обмотки и мощных генераторов для гидроэлектростанций.

## § 2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Работа электрических машин основана на законах: электромагнитной индукции, электромагнитных сил и полного тока.

Согласно закону электромагнитной индукции величина электродвижущей силы (сокращенно э.д.с.) в проводнике определяется равенством

$$E = Blv \sin\alpha \quad [в], \tag{1}$$

где:

$B$ — величина магнитной индукции в $\frac{в \cdot сек}{м^2}$;

$l$ — активная длина проводника (т. е. та его часть, которая находится в магнитном поле) в $м$;

$v$ — скорость движения проводника в $м/сек$;

$\alpha$ — угол между направлением движения проводника и направлением магнитных линий. (При движении проводника перпендикулярно магнитным силовым линиям $\alpha = 90°$, а $\sin 90° = 1$).

Если замкнуть концы проводника на внешнюю сеть, то по нему потечет ток $I$.

Согласно закону электромагнитных сил однородное магнитное поле действует на проводник с силой, пропорциональной величине тока, магнитной индукции, активной длине проводника и синусу угла $\alpha$ между направлением тока и направлением магнитных силовых линий

$$F_э = BIl \sin\alpha \quad [н], \tag{2}$$

где:

$B$ — величина магнитной индукции в $\frac{в \cdot сек}{м^2}$;

$I$ — величина тока в $а$;

$l$ — активная длина проводника в $м$;

$F_э$ — электромагнитная сила в $н$ (1 ньютон — сила, сообщающая единице массы 1 $кг$ ускорение 1 $м/сек^2$).

Если сопоставить эти два уравнения, уравнения (1) и (2), то после соответствующего преобразования получаем, что

$$Fv = EI, \tag{3}$$

где $F = F_э$ — приложенная извне механическая сила.

Это уравнение характеризует преобразование механической мощности $P_м = Fv$ в равную ей по величине электрическую мощность $P_э = EI$.

В генераторном режиме э.д.с., наводимая в проводнике, является причиной возникновения и поддержания тока в замкнутой цепи. Направления тока и э.д.с. совпадают [1].

---

[1] Направление наведенной э.д.с. определяется правилом правой руки. Если правую руку расположить в магнитном поле так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а отогнутый большой палец указывал направление движения проводника, то вытянутые четыре пальца покажут направление наведенной э.д.с.

Электромагнитная же механическая сила $F_э$, определяемая по правилу левой руки, направлена против движения проводника, препятствует его движению, и для преодоления ее тормозного действия необходимо приложить некую внешнюю силу, равную и противоположно направленную электромагнитной силе. Такая внешняя сила создается вращающим моментом на валу от первичного двигателя, который вращает якорь генератора.

В двигательном режиме электромагнитная сила $F_э$ является причиной механического движения. Э.д.с., наводимая в проводнике, в данном случае противодействует движению и направлена против тока. Для ее преодоления должно быть приложено внешнее напряжение $U=E+Ir$, откуда мощность, потребляемая из сети, будет равна

$$UI=EI+I^2r.$$

Подставляя в эту формулу значение э.д.с. [формула (1)], получаем

$$UI=BlvI\sin\alpha+I^2r.$$

Но $BIl\sin\alpha=F_э$, следовательно, и

$$UI=F_э v+I^2r, \qquad (4)$$

т. е. электрическая мощность, потребляемая из сети, преобразуется в механическую мощность и частично расходуется на тепловые потери в проводнике.

## § 3. ПОЛУЧЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ Э.Д.С. В ГЕНЕРАТОРАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При вращении в магнитном поле (рис. 3) проводника в виде витка в его активных сторонах $ab$ и $cd$ наводятся э.д.с., величины мгновенных значений которых определяются по формуле

$$e=Blv\sin\alpha. \qquad (5)$$

Пользуясь правилом правой руки, можно установить, что э.д.с., наводимые в обеих активных сторонах витка, взаимно складываются.

Величина э.д.с. на концах витка будет зависеть от угла $\alpha$, под которым активные стороны витка пересекают магнитные силовые линии. При этом, при переходе активных сторон витка через плоскость, перпендикулярную магнитному полю, наводимые в них э.д.с. будут менять свое направление. На концах проводника будет действовать э.д.с., переменная как по величине, так и по направлению.

Если концы витка соединить через контактные кольца с внешней цепью, то по внешней цепи будет протекать переменный ток, изменяющийся с частотой

$$f=\frac{pn}{60}, \qquad (6)$$

где $p$ — число пар полюсов;

$n$ — число оборотов якоря в минуту.

Таким образом, во всяком электрическом генераторе, работа которого основана на вращении проводника в магнитном поле, создается переменная э.д.с., которая может служить источником переменного тока.

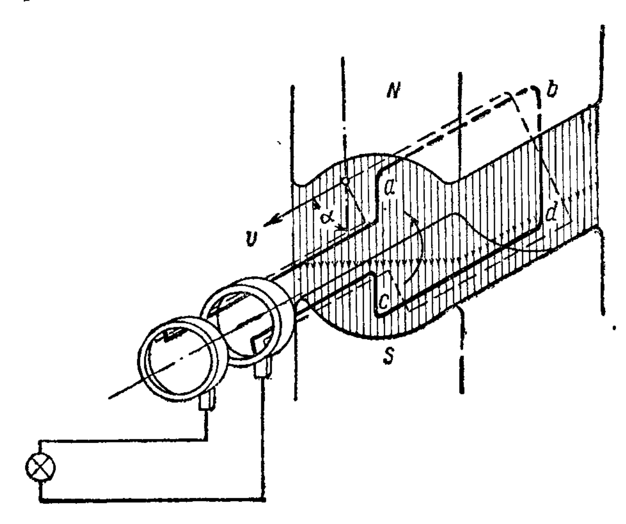



Рис. 3. Вращение витка в магнитном поле

Для получения во внешней цепи электрического тока одного направления электрическая машина снабжается устройством, называемым коллектором.

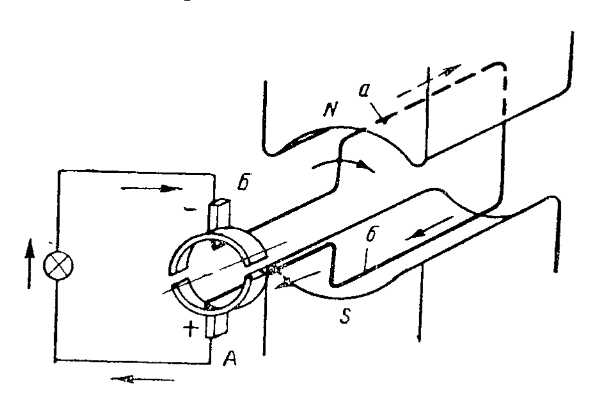



Рис. 4. Работа коллектора

Простейший коллектор состоит из двух полуколец (рис. 4), к которым присоединены концы двух соединенных между собой проводников. Коллектор вращается вместе с проводниками.

К полукольцам — коллекторным пластинам — прижимаются неподвижные щетки, при помощи которых внешняя цепь присоединяется к обмотке якоря.

Предположим, что проводник движется по часовой стрелке в однородном магнитном поле. Направление э.д.с., наведенной в проводнике, находящемся под северным полюсом магнита, будет «от нас», а в проводнике, находящемся под южным полюсом,—«к нам». Пока проводник *а* движется под северным полюсом, в нем наводится э.д.с. одного направления, изменяющаяся по величине от нуля до амплитудного значения. В то же время в проводнике *б*, движущемся под южным полюсом, наводится э.д.с. обратного направления, также изменяющаяся по величине от нуля до амплитудного значения. Если к щеткам подключить внешнюю цепь, то в ней будет протекать ток от щетки *А* к щетке *Б*. Следовательно, щетка *А* будет положительной, а щетка *Б* — отрицательной. При достижении проводниками нейтральной линии э.д.с. в них

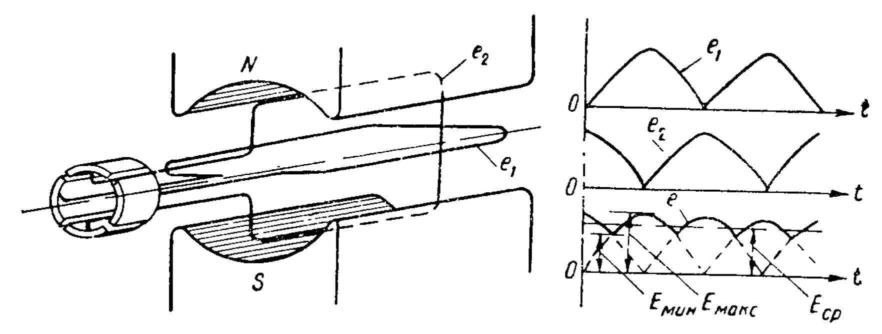



Рис. 5. Сглаживание пульсации

будет равна нулю. Щетки замкнут накоротко обе коллекторные пластины. Миновав нейтральную линию, проводник *а* попадает под действие южного полюса магнита, а проводник *б* — северного полюса. Направление э.д.с. в проводниках изменяется на обратное: в проводнике *а* — «к нам», в проводнике *б* — «от нас». Однако в это же время под щетку *А* подойдет коллекторная пластина, с которой соединен проводник *б*, а под щетку *Б* — коллекторная пластина, с которой соединен проводник *а*. Через щетки во внешней цепи ток будет протекать в прежнем направлении, следовательно, полярность щеток не изменится.

Будучи постоянным по направлению, ток, наводимый в проводниках и протекающий по внешней цепи, переменен по величине — пульсирующий. Пульсацию тока можно сгладить путем увеличения числа проводников, вращающихся в магнитном поле машины, и соответствующего увеличения числа коллекторных пластин (рис. 5).

Величина пульсации (колебания э.д.с.) условно может быть выражена в процентах. Обозначим величину максимальной э.д.с.

через $E_{макс}$, величину минимальной э.д.с. через $E_{мин}$, а среднее значение э.д.с. — $E_{ср}$.

Тогда изменение э.д.с. относительно ее среднего значения будет равно $\Delta E = \frac{E_{макс}-E_{мин}}{2}$, в то время как $E_{ср}=\frac{E_{макс}+E_{мин}}{2}$. Процентное колебание напряжения составит

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{E}100 = \frac{E_{макс}-E_{мин}}{E_{макс}+E_{мин}}100 = \frac{1-\cos\frac{\pi}{N_к}}{1+\cos\frac{\pi}{N_к}}100 = 100\,\mathrm{tg}^2\frac{\pi}{2N_к}\,\%, \quad (7)$$

где $N_к$ — число коллекторных пластин, приходящихся на пару полюсов ($N_к$—четное число).

Значения $\varepsilon$ в % в зависимости от $N_к$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

| $N_к$ | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 20 | 40 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\varepsilon$ | 100 | 17,2 | 7,2 | 4 | 2,5 | 0,62 | 0,16 |

При большом числе проводников напряжение на щетках и создаваемый им во внешней цепи электрический ток будут практически постоянными как по величине, так и по направлению.

Пара соединенных между собой проводников образует секцию обмотки. При последовательном соединении отдельных проводников наводимые в них э.д.с. складываются. Поэтому секции обмотки могут состоять из одного или нескольких витков. Начало и конец каждой секции присоединяются к своей коллекторной пластине. Стороны секций укладываются в пазы таким образом, чтобы одна сторона располагалась под полюсом одной полярности, а другая — под полюсом другой полярности. Лишь при соблюдении этого условия наводимые в проводниках э.д.с. будут складываться. Все секции обмотки соединяются между собой через коллекторные пластины.

Таким образом, коллектор является важной частью всякой электрической машины постоянного тока.

Постоянный ток можно получить и без помощи коллектора. Для этого проводник должен перемещаться в равномерном магнитном поле строго определенной полярности. Такие электрические машины называются униполярными. Однако наводимая в них э.д.с. не превышает 3—6 *в*, и поэтому указанные машины применяются редко.

## § 4. УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрическая машина постоянного тока имеет две основные части: неподвижную — статор и вращающуюся — якорь с коллектором (рис. 6).

Статор состоит из станины, основных полюсов, служащих для создания основного потока, и дополнительных полюсов, предназначенных для улучшения условий коммутации.

Часть станины, являющаяся магнитопроводом машины, называется ярмом.

Станины изготовляются из чугуна или стали.

Вращающаяся часть электрической машины состоит из якоря и коллектора, которые крепятся на валу.

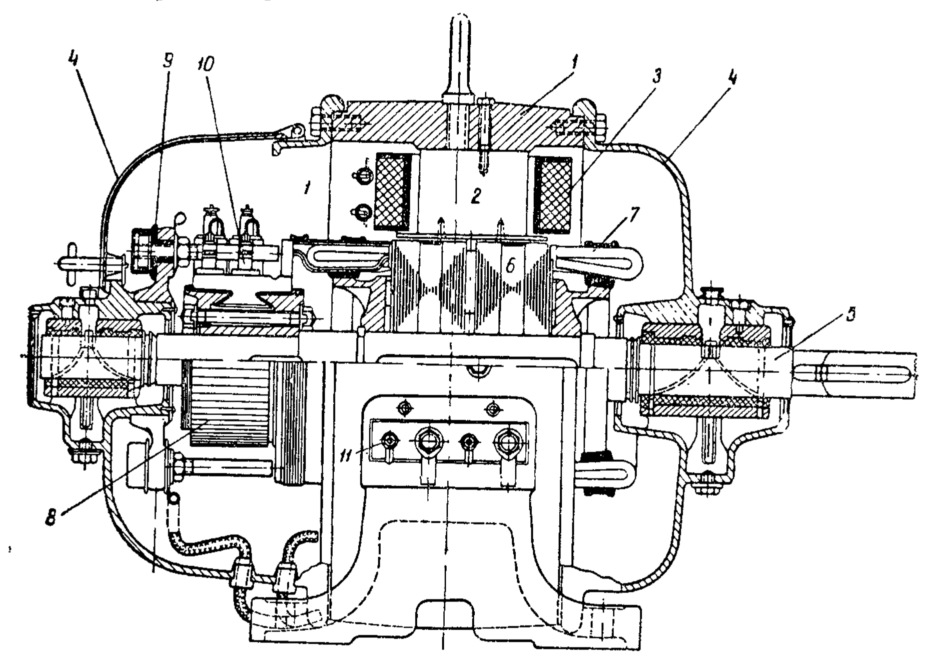



Рис. 6. Машина постоянного тока:

1—станина; 2—сердечник главного полюса; 3—катушка главного полюса; 4—подшипниковый щит; 5—вал; 6—сердечник якоря; 7—обмотка якоря; 8—коллектор; 9—траверса; 10—щетка; 11—щиток генератора с выводами

В современных машинах магнитный поток создается с помощью полюсов возбуждения, которые представляют собой электромагниты. Электрические машины с постоянными магнитами, так называемые магнитоэлектрические машины, изготовляются лишь малой мощности и применяются для специальных целей, например, магнето для зажигания двигателей внутреннего сгорания некоторых типов, тахогенераторы для измерения скорости вращения.

Главные полюсы (рис. 7, *а*) электрических машин состоят из сердечников, полюсных катушек и полюсных наконечников (башмаков).

Сердечники главных полюсов набираются из отдельных, изолированных друг от друга листов электротехнической стали тол-

щиной от 0,5 до 1,5 *мм*. Листы сердечника спрессовываются в пакеты. Полюсные наконечники могут представлять с сердечником одно целое или изготовляться отдельно и крепиться к ярму болтами. Полюсные наконечники имеют вогнутую форму со скошенными краями для лучшего распределения магнитного потока.

Электрические машины мощностью свыше 1 *квт* имеют дополнительные полюсы, чтобы уменьшить искрение под щетками.

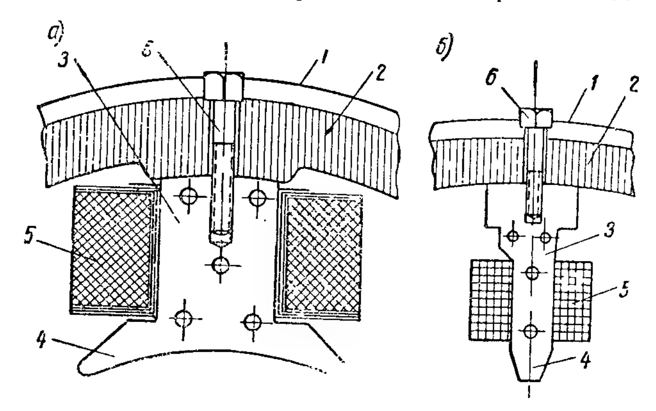



Рис. 7. Главный и дополнительный полюсы:
1—корпус машины; 2—ярмо; 3—сердечник полюса; 4—полюсный наконечник (башмак); 5—полюсная катушка; 6—болт для крепления полюса

Дополнительные полюсы (рис. 7, *б*) устанавливаются между главными полюсами по линии геометрической нейтрали. Они также состоят из сердечников с полюсным наконечником и полюсной катушки. В отличие от главных полюсов их сердечники часто делаются сплошными из кованой стали или литыми.

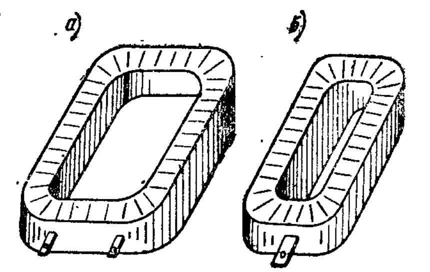



Рис. 8. Катушки главного (*а*) и дополнительного (*б*) полюсов

Полюсные катушки (рис. 8) предназначаются для возбуждения в сердечнике полюсов магнитного потока. Они наматываются из круглой медной проволоки или из гибких шин и закрепляются на специальном каркасе. Катушки соединяются между собой по определенной схеме, чаще всего последовательно, и образуют обмотку возбуждения машины.

Катушки дополнительных полюсов обычно имеют небольшое число витков и выполняются из медной проволоки или шин большого сечения с целью уменьшения активного сопротивления катушек, так как они включаются последовательно с обмоткой якоря.

Современные электрические машины выполняются с двумя, тремя, четырьмя и более парами полюсов.

К станине машины с обоих ее торцов крепятся болтами подшипниковые щиты, предназначенные для опоры вала якоря, а также для защиты внутренних частей машины от внешних воздействий.

Между полюсными башмаками машины и поверхностью якоря должен быть строго определенный воздушный зазор, величина которого у машин постоянного тока не превышает 1,5 *мм*. Поэтому подшипниковые щиты должны быть строго сцентрированы по отношению к станине.

Подшипниковые щиты изготовляются из чугуна или стали. Щит со стороны коллектора имеет удлиненную форму и вентиляционные отверстия на торцовой стороне для забора воздуха, засасываемого вентилятором.

Большинство быстроходных электрических машин снабжено подшипниками качения.

Капсули подшипников крепятся в расточках подшипниковых щитов. Со стороны коллектора устанавливается шариковый подшипник, а со стороны привода — роликовый.

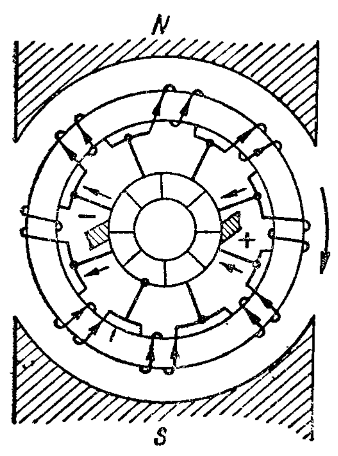



Рис. 9. Кольцевой якорь Грамма

Станина в нижней части имеет специальные приливы-лапки для крепления машины к фундаменту. Кольцо на корпусе машины служит для подъема ее при демонтаже.

Современные машины постоянного тока имеют барабанный якорь, изобретенный инженером П. Н. Яблочковым.

До изобретения барабанного якоря электрические машины имели кольцевой якорь. Обмотка последнего наматывалась спирально на кольцевой сердечник и замыкалась на себя. На рис. 9 показана обмотка, состоящая из восьми секций, соединенных последовательно между собой. От каждой секции сделан вывод к соответствующей коллекторной пластине.

Как видно из схемы, направление результирующей э.д.с., наводимой в верхней половине обмотки, противоположно направлению э.д.с., наводимой в нижней половине обмотки. При отсутствии внешней цепи внутри обмотки ток не возникает, так как сумма э.д.с. всех секций будет равна нулю. Однако при подключении внешней цепи к щеткам машины, расположенным на нейтральной линии, по цепи будет протекать электрический ток.

Кольцевой якорь имеет ряд существенных недостатков, в том числе неэкономичное использование меди обмотки, так как э.д.с. наводится только в той части обмотки, которая пересекается магнитными силовыми линиями. Магнитные силовые линии проходят

через кольцевой сердечник, но внутрь кольца не попадают, и э.д.с. наводится лишь в наружной половине витков обмотки. Внутренняя половина витков в наведении э.д.с. не участвует, что удорожает стоимость обмотки и увеличивает ее активное сопротивление. Кроме того, обмотку можно выполнить лишь вручную.

Барабанный якорь электрической машины постоянного тока (рис. 10) имеет стальной цилиндрический сердечник, укрепленный на валу. Сердечник якоря для уменьшения вихревых токов собирается из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 *мм*, изолированных друг от друга тонким слоем лака или слоем окиси, образующейся на поверхности стали. Листы якоря штампуются в форме диска с отверстием в центре для вала и пазами по окружности диска.

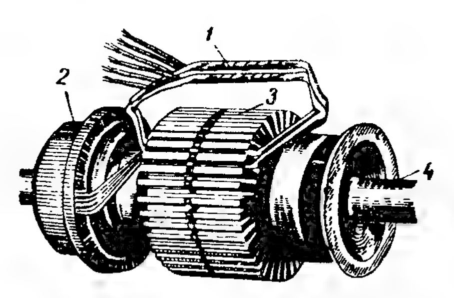



**Рис. 10. Якорь машины постоянного тока:**

1—секции обмотки; 2—коллектор; 3—сердечник якоря; 4—вал

Отштампованные листы собираются в пакет на валу и спрессовываются между двумя нажимными шайбами.

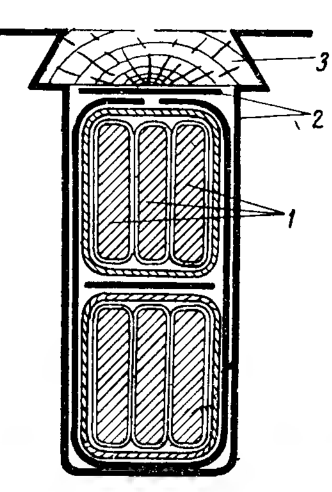



**Рис. 11. Закрепление обмотки в пазу:**

1—обмотка; 2—пазовая изоляция; 3—клин

В пазы сердечника укладываются активные стороны проводников, составляющих обмотку якоря. Обмотка якоря выполняется из медной проволоки или стержней и тщательно изолируется от сердечника.

В зависимости от вида обмоток, типа и условий работы машины пазы могут быть различной формы: открытые, полузакрытые, закрытые.

Обмотка в открытых и полузакрытых пазах закрепляется при помощи бандажей или клиньев (рис. 11).

Бандажи выполняются из стальной бандажной проволоки диаметром 0,6—1,2 *мм* в зависимости от габаритов машины и наматываются в один ряд на якорь после укладки обмотки. Для того чтобы бандаж не выступал над поверхностью якоря, в сердечнике делаются специальные бандажные канавки.

Для предохранения изоляции обмотки от повреждения ее бандажом под бандаж подкладывается электротехнический картон (прессшпан) толщиной 0,5 *мм*. Отдельные витки бандажа

скрепляются между собой специальными хомутиками из жести и пропаиваются.

Свободные концы секций обмотки припаиваются к коллекторным пластинам.

Для охлаждения якоря в нем делают осевые и радиальные вентиляционные каналы, по которым проходит охлаждающий воздух.

Вал якоря (рис. 12) выполняется из высокосортной стали. Для закрепления сердечника служит шпонка. Шейки вала находятся в подшипниках. На одном валу с якорем насаживается коллектор.

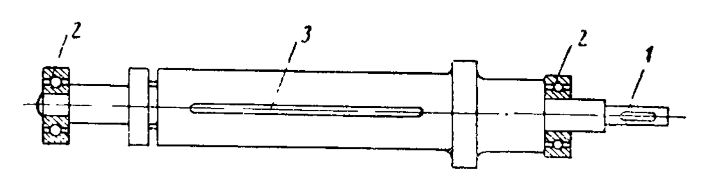



Рис. 12. Вал якоря:
1—стальной вал; 2—подшипник; 3—шпоночная канавка

Со стороны, противоположной коллектору, вал имеет свободный конец со шпоночной канавкой для насадки шкива или соединительной муфты.

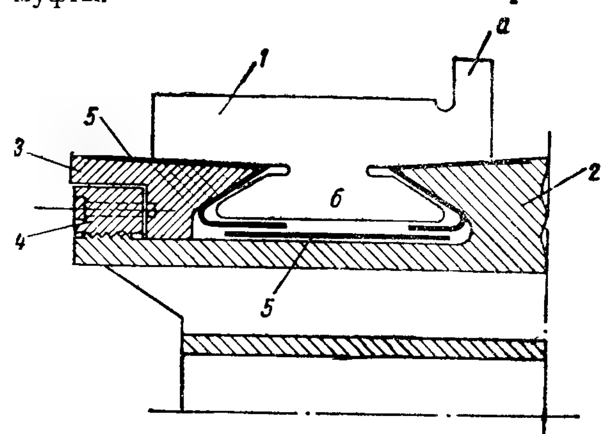



Рис. 13. Коллектор:
1—коллекторная пластина; 2—втулка; 3—нажимное кольцо; 4—гайка; 5—изоляция; а—петушок; б—ласточкин хвост

Коллектор машины со щетками служит для выпрямления переменного тока. Он собирается из отдельных медных пластин клинообразного сечения (рис. 13), изолированных друг от друга прокладками из твердого миканита толщиной 0,6—1 *мм*. Пластины коллектора с помощью нажимного конуса (шайбы) закрепляются на стальной втулке, от которой они изолируются специальными манжетами из формовочного миканита.

Коллектор должен иметь строго цилиндрическую форму. Отдельные коллекторные пластины не должны выступать над поверхностью коллектора и не должны западать. Биение коллектора не должно превышать 0,03—0,04 *мм*.

Коллекторные пластины имеют клиновидное сечение и изготовляются из коллекторной меди. Концы обмотки якоря припаиваются к выступам на коллекторных пластинах — петушкам.

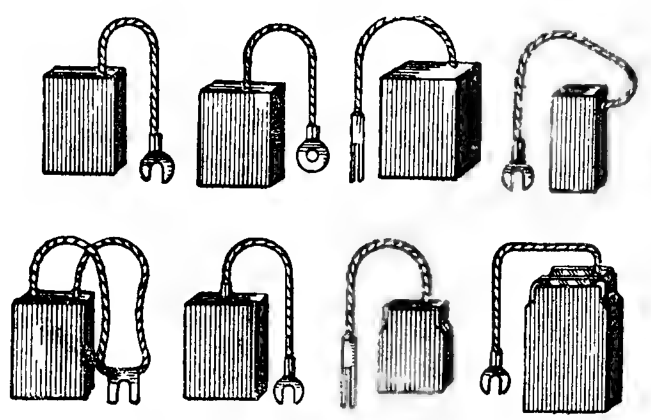


Рис. 14. Щетки электрических машин

Съем тока с коллектора осуществляется посредством щеток, имеющих с коллектором скользящий контакт. Щетки изготовляют в виде прямоугольных брусков (рис. 14) из медных, угольных и графитных порошков.

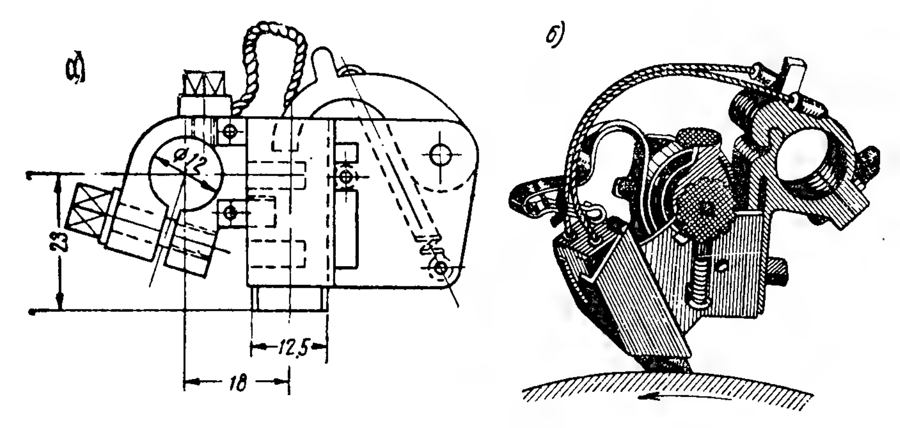



Рис. 15. Щеткодержатели

Щетки различаются по твердости и характеризуются падением напряжения на переходном сопротивлении и номинальной плотностью тока. Они укрепляются в специальных щеткодержателях, которые удерживают щетки в определенных положениях и создают требуемое давление для хорошего контакта между щет-

ками и поверхностью коллектора. В процессе работы щетки истираются и уменьшаются по высоте. Однако нарушения контакта между щеткой и поверхностью коллектора при этом не происходит, так как на щетку давит пружина щеткодержателя, и контакт не ухудшается. Величина допустимого износа щетки определяется размерами щеткодержателя.

Щетки с контактными зажимами щеткодержателей соединяются при помощи гибких медных проводов с кабельными наконечниками.

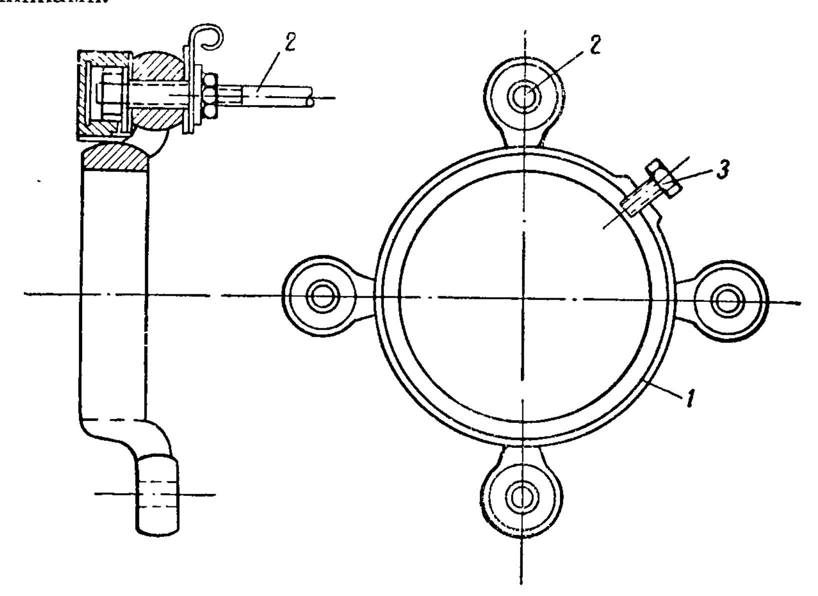



Рис. 16. Щеточная траверса:
1—чугунное кольцо; 2—пальцы; 3—установочный болт

Различают два типа щеткодержателей: **радиальные** (рис. 15,*а*) и **реактивные** или **наклонные** (рис. 15,*б*).

Радиальные щеткодержатели применяются в электрических машинах с переменным направлением вращения. В них щетки устанавливаются радиально к коллектору. В машинах с постоянным направлением вращения (левым или правым) часто используются реактивные щеткодержатели. Щетки в них располагаются наклонно, под определенным углом к нормали. При этом наклон щетки должен быть по ходу коллектора.

Крепление щеткодержателей со щетками и равномерное распределение их по поверхности коллектора производятся при помощи щеточных траверс (рис. 16). Траверса отливается из чугуна и крепится установочным винтом к выступу одного из подшипниковых щитов. Траверса имеет форму кольца с приливами для стальных пальцев, на которых и устанавливаются щеткодержатели.

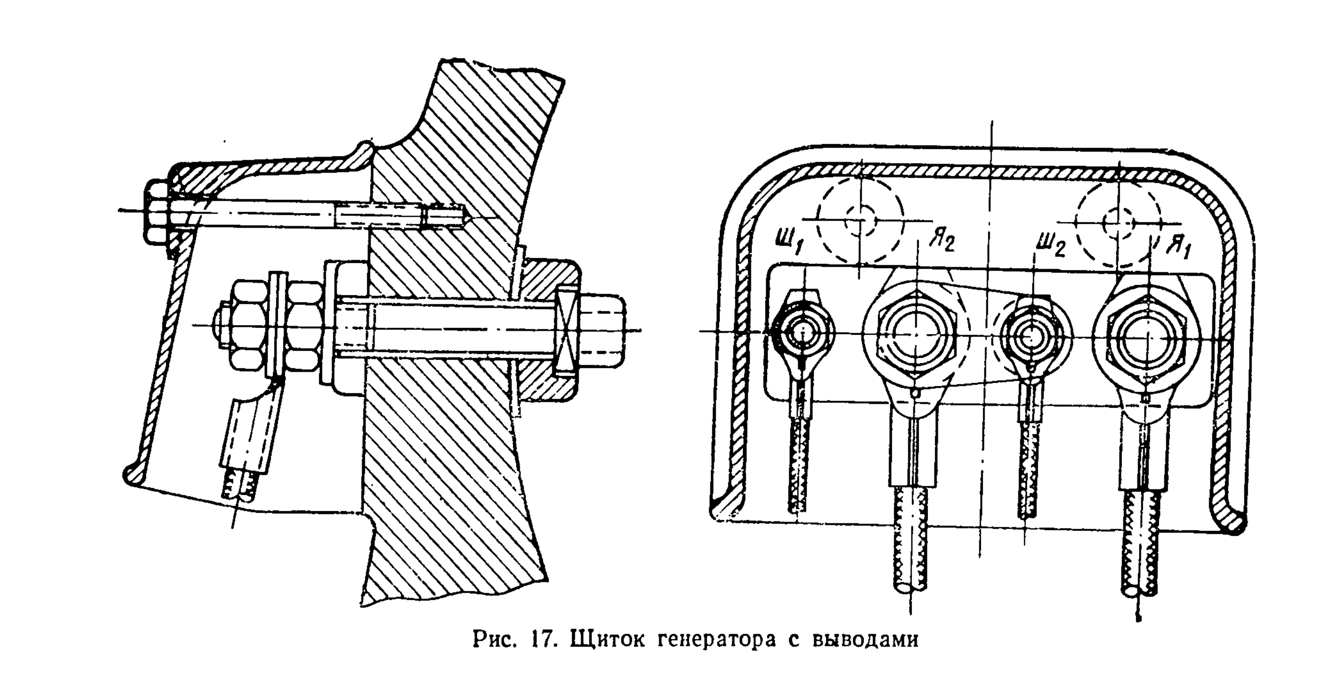



Рис. 17. Щиток генератора с выводами

Пальцы изолируются от приливов траверсы и корпуса машины посредством изоляционных втулок и шайб из миканита.

Траверса может поворачиваться по окружности для установки щеток в положение, при котором искрение под ними будет наименьшим.

Концы обмоток электрической машины выводятся к зажимам коробки выводов (рис. 17), служащей для присоединения проводов электрической сети. Коробка выводов состоит из корпуса со съемной крышкой, доски зажимов из изолирующего материала, зажимов и соединительных пластинок.

У водозащищенных и герметических машин провода сети в коробку выводов вводятся через сальники.

## § 5. ИСПОЛНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ИХ НОМИНАЛЬНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

По способу защиты от внешних воздействий различают машины открытые, защищенные, водозащищенные, герметически закрытые, взрывобезопасные.

Открытой называется такая машина, у которой все вращающиеся и токоведущие части не имеют специальных защитных приспособлений.

Защищенной называется машина, у которой имеется специальное защитное приспособление, предохраняющее от попадания внутрь машины водяных капель, падающих вертикально или под углом не более 30° к вертикали.

Водозащищенной называется машина, у которой исключена возможность проникновения капель воды внутрь машины при обливании ее струей под давлением не менее 2 *атм.*

Герметически закрытой называется машина, имеющая плотно закрытый корпус, не допускающий проникновения влаги внутрь машины при полном погружении ее в воду в течение четырех часов.

Взрывобезопасной называется машина, которая противостоит возможным взрывам газа внутри машины и не воспламеняет газ в окружающей машину среде.

По роду охлаждения различают:

машины с естественным охлаждением; эти машины не имеют никаких специальных приспособлений для охлаждения;

машины с самовентиляцией; охлаждение таких машин производится вентиляторами и другими приспособлениями, укрепляемыми на валу машины;

обдуваемые машины (с наружной самовентиляцией). Охлаждение их осуществляется обдуванием наружной поверхности двигателя с помощью вентилятора, закрепленного на валу машины, в то время, как внутренние части машины закрыты от доступа наружного воздуха;

машины с посторонним охлаждением; они охлаждаются посредством вентиляторов, устанавливаемых вне машины.

Электрические машины характеризуются номинальными электрическими величинами.

Номинальным режимом работы электрической машины называется режим, для которого она предназначена заводом-изготовителем.

Номинальный режим характеризуется величинами, указанными на табличке-паспорте, укрепленном на корпусе машины, и называемыми номинальными, а именно: номинальные мощность, напряжение, ток, скорость вращения, ток возбуждения и т. д.

Номинальная мощность:

1) для генераторов постоянного тока — электрическая мощность на зажимах машины, выраженная в ваттах (*вт*) или киловаттах (*квт*);

2) для генераторов переменного тока — кажущаяся электрическая мощность на зажимах машины, выраженная в вольтамперах (*ва*) или киловольтамперах (*ква*);

3) для двигателей — полезная механическая мощность, развиваемая на валу электрического двигателя и выраженная в *вт* или *квт*.

Номинальное напряжение — напряжение на зажимах машины, выраженное в вольтах (*в*) или киловольтах (*кв*) и соответствующее номинальному режиму работы генератора или двигателя. Для машин переменного трехфазного тока это междуфазовое (линейное) напряжение.

Номинальный ток — ток, соответствующий номинальному режиму работы двигателя.

Номинальный коэффициент мощности — коэффициент мощности, соответствующий номинальному режиму работы машины переменного тока.

Номинальный коэффициент полезного действия — отношение полезной (отдаваемой) мощности к затрачиваемой (подводимой) мощности при номинальном режиме работы двигателя.

Номинальная скорость вращения — характеризуется числом оборотов в минуту, которое при номинальном режиме работы машины должно соответствовать данным, указанным на заводском щитке.

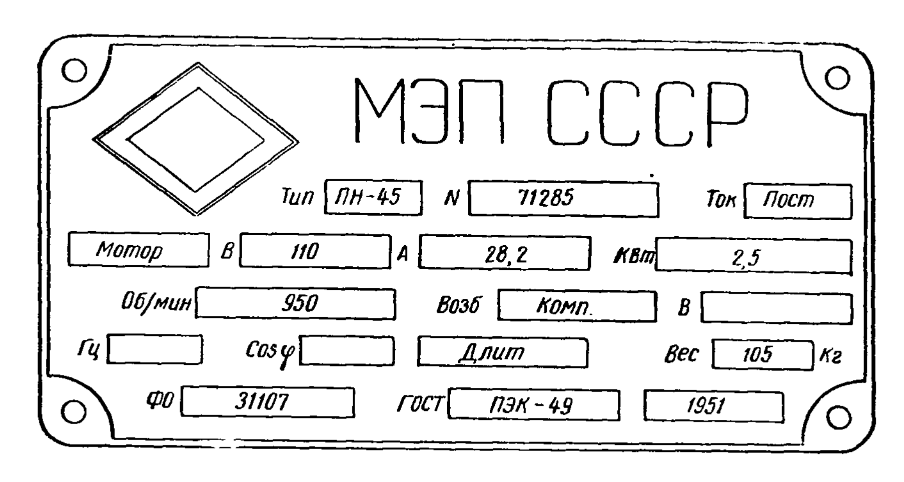
Номинальный вращающий момент — момент, развиваемый двигателем при номинальной мощности, номинальном числе оборотов и номинальном напряжении, указанных на заводском щитке двигателя.

На корпусе каждой электрической машины должен быть укреплен заводской щиток.

Заводским щитком машины называется табличка-паспорт (рис. 18) с указанием завода-изготовителя, заводского номера машины, основных данных номинального режима ее работы, года

выпуска и номера ГОСТа, в соответствии с требованиями которого она изготовлена.

Наиболее распространенным типом электрических машин постоянного тока являются машины серии ПН, которые могут быть использованы как генераторы и как электрические двигатели, например, машины типов ПН-2,5; ПН-5; ПН-10; ПН-17,5; ПН-28,5;



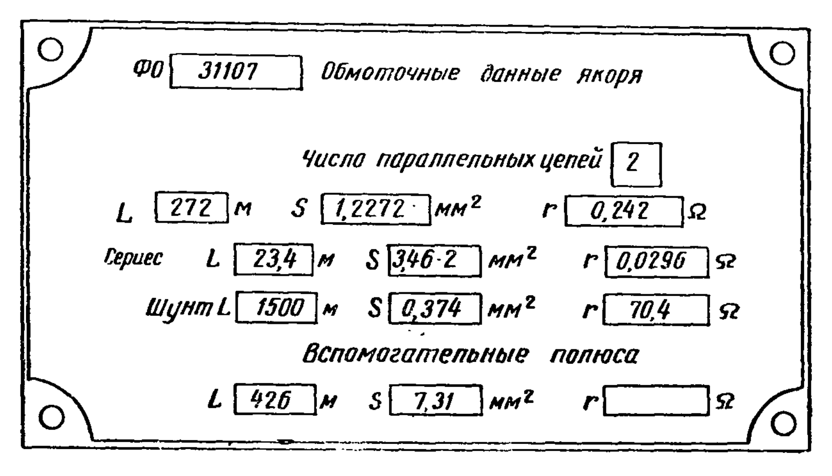




Рис. 18. Заводская табличка-паспорт на корпусе электрической машины

ПН-45; ПН-68; ПН-80; ПН-100 и др. Цифры после буквенного обозначения показывают примерно в десять раз увеличенную номинальную мощность машины при 1500 об/мин.

Кроме того, выпускаются генераторы постоянного тока серии МП с числом оборотов 375—750 в минуту, мощностью от 3,8 до 66 *квт,* на напряжение 115 и 230 *в*.

## *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. Кем впервые была создана электрическая машина постоянного тока, основанная на вращательном движении?
2. Кем был создан барабанный якорь и каковы его преимущества по сравнению с кольцевым якорем?
3. Кто является создателем электрических машин трехфазного переменного тока?
4. На каком принципе основано действие машин постоянного тока?
5. Какова роль коллектора и как он устроен?
6. Из каких частей состоит машина постоянного тока и каково их назначение?
7. Как устроен якорь машины постоянного тока?
8. Как осуществляется присоединение внешней цепи к коллектору?
9. Какие различают виды щеткодержателей и где их применяют?
10. Каково назначение траверс и как они устроены?
11. Как различаются электрические машины по способу исполнения?
12. Какими номинальными величинами характеризуются электрические машины?
13. Что понимается под номинальной электрической величиной?
14. Какие данные должна содержать табличка-паспорт, укрепляемая на корпусе электрической машины?

## *Глава II*

# ОБМОТКИ ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

## § 6. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБМОТКАХ ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Обмотка якоря машины представляет собой совокупность всех проводников, уложенных в пазы якоря, соединенных между собой электрически по определенной схеме и участвующих в наведении э.д.с.

Обмотка якоря состоит из отдельных секций. **Секцией** называется часть якорной обмотки, заключенная между двумя коллекторными пластинами.

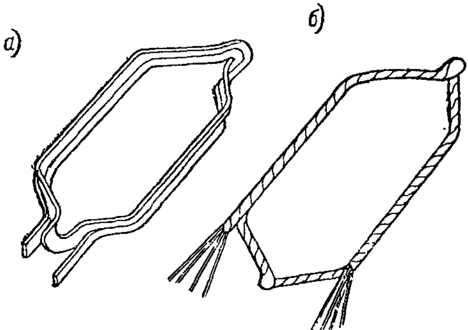


Рис. 19. Секция обмотки:
*а*—из прямоугольного провода; *б*—из круглых проводников

**Секция обмотки** (рис. 19) состоит из одного или нескольких последовательно соединенных витков. Начало и конец секции присоединены к двум коллекторным пластинам. Все секции соединяются между собой последовательно и образуют замкнутую цепь.

Часть секции, уложенная в паз и при вращении якоря пересекаемая магнитными силовыми линиями, называется **активной стороной секции**. Части секции, выступающие за преде-

лы паза, не участвующие в наведении э.д.с. и предназначенные для соединения между собой активных сторон секций, называются лобовыми частями обмотки (рис. 20).

Секции имеют две активные стороны, которые всегда располагаются под разноименными полюсами.

Число секций, независимо от схемы соединения обмотки, всегда равно числу коллекторных пластин.

Различают однослойные и двухслойные обмотки якоря машины. В том случае, когда в каждом пазу укладывается лишь одна активная сторона секции, обмотка будет однослойной.

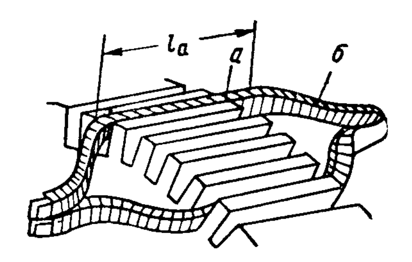



Рис. 20. Секция обмотки, уложенная в паз:
*а*—активная сторона секции; *б*—лобовая часть

Двухслойная обмотка получается из однослойной. При этом в каждом пазу располагаются две активные стороны двух различных секций: начальная сторона (нечетный проводник) одной секции и конечная сторона (четный проводник) другой секции (рис. 21).

Нечетный проводник всегда лежит в верхнем слое одного паза, а четный — в нижнем слое другого паза. Такой паз называется элементарным. Двухслойные обмотки позволяют вдвое сократить число пазов якоря.

Если в одном пазу укладывается не две, а большее число активных сторон, то такой паз разбивается на ряд элементарных

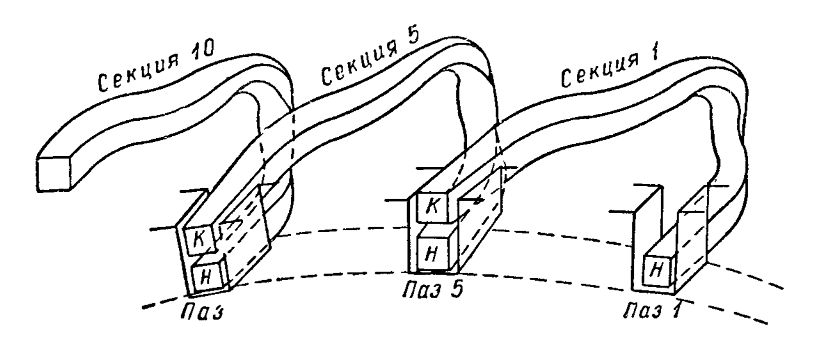



Рис. 21. Укладка секций двухслойной обмотки

пазов из расчета, что на каждый элементарный паз приходятся две активные стороны двух разных секций. На рис. 22 показаны пазы, состоящие из одного, двух и трех элементарных пазов.

Так как каждая секция состоит из двух активных сторон, то один элементарный паз соответствует одной секции. В то же время к каждой коллекторной пластине присоединяется конец одной секции и начало другой секции, последовательно соединенной с

первой. Следовательно, на каждую секцию приходится одна коллекторная пластина или одно коллекторное деление. Отсюда

$$Z_э = S = K, \qquad (8)$$

где:

$Z_э$— число элементарных пазов;

$S$— число секций обмотки;

$K$—число коллекторных пластин.

В зависимости от схемы соединения между собой секций различают обмотки: 1) простые петлевые или параллельные; 2) простые волновые, или последовательные; 3) сложные петлевые; 4) сложные волновые; 5) комбинированные, или лягушечьи.

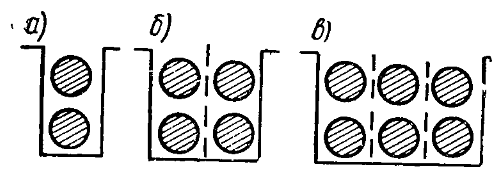



Рис. 22. Элементарные пазы:
*а*—один элементарный паз; *б*—два элементарных паза; *в*—три элементарных паза

## § 7. ПРОСТАЯ ПЕТЛЕВАЯ (ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ) ОБМОТКА

**Петлевой обмоткой якоря** называется обмотка, у которой концы секции присоединены к двум рядом лежащим коллекторным пластинам (рис. 23). При выполнении этой обмотки совершают поступательные и возвратные движения по окружности якоря.

Всякая обмотка характеризуется шагами обмотки по пазам и по коллектору. При этом различают первый частичный шаг $y_1$ второй частичный шаг $y_2$ и результирующий шаг $y$.

**Первым частичным шагом** обмотки $y^{I}$ называют число пазов, на которое отстоит по окружности якоря конечная сторона секции от ее начальной стороны.

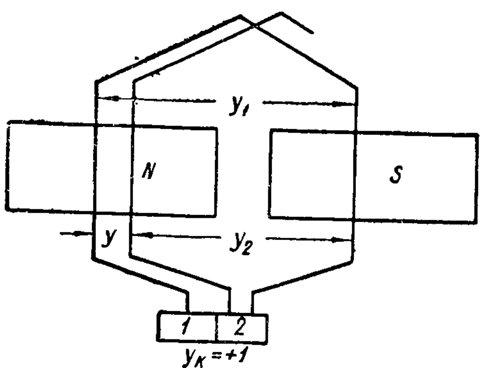



Рис. 23. Схема простой петлевой обмотки

**Вторым частичным шагом** обмотки $y_2$ называют число пазов, на которое отстоит по окружности якоря начальная сторона последующей секции от конечной стороны предыдущей секции.

Результирующим шагом обмотки $y$ называют число пазов, на которое отстоит по окружности якоря начальная сторона последующей секции от начальной стороны предыдущей секции. Этот шаг у петлевой обмотки определяется как разность между первым частичным шагом и вторым $y = y_1 - y_2$.

Практически первый шаг определяют числом реальных пазов, однако при рассмотрении свойств обмоток значительно удобнее исходить из числа элементарных пазов.

Как уже было указано, активные стороны одной секции должны располагаться под полюсами разной полярности. Ширина секции в этом случае приблизительно должна быть равна полюсному делению:

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}, \tag{9}$$

где:

$\tau$ — полюсное деление;

$D_a$ — диаметр якоря;

$p$ — число пар полюсов.

Отсюда следует, что первый шаг обмотки всегда примерно равен полюсному делению $\tau$. На одно полюсное деление приходится $\frac{Z_э}{2p}$ элементарных пазов (где $Z_э$ — число всех элементарных пазов). Однако число элементарных пазов может не делиться без остатка на число полюсов $2p$. В то же время шаг $y_1$ должен быть целым числом. Поэтому первый шаг обмотки определяют по формуле:

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \pm b, \tag{10}$$

где $b$ — величина, меньшая единицы, суммируемая или вычитаемая из частичного шага для получения шага, выраженного целым числом.

При вычитании $b$ получается обмотка с укороченным шагом, так как ширина секции в этом случае несколько меньше полюсного деления.

Обмотка якоря характеризуется также шагом по коллектору $y_к$.

Шагом по коллектору $y_к$ называют число пластин, на которое отстоит по окружности коллектора место присоединения конечной стороны секции от места присоединения ее начальной стороны.

В то же время начальный конец последующей секции смещается относительно начала предыдущей секции на $y_к$ коллекторных пластин. Результирующий и коллекторный шаги должны строго согласовываться друг с другом.

У простой петлевой обмотки начало и конец каждой секции присоединяются к двум соседним пластинам. Поэтому у этой обмотки

$$y_к = \pm 1, \quad (11)$$

где знак + (плюс) или — (минус) указывают направление выполнения обмотки.

При знаке + обмотка выполняется вправо (по часовой стрелке) и называется правоходовой; при знаке — обмотка выполняется в левую сторону (против часовой стрелки) и называется левоходовой.

Таким образом, одному результирующему шагу $y$ соответствует шаг по коллектору, равный одной коллекторной пластине.

Отсюда результирующий и коллекторный шаги численно равны между собой, т. е.

$$y = y_к = \pm 1. \quad (12)$$

Число коллекторных пластин определяется из отношения

$$K = \frac{Z_э S_п}{2}, \quad (13)$$

где $S_п$ — число сторон секций обмотки в пазу, т. е. число выведенных концов секций, присоединяемых к коллекторным пластинам.

Как было отмечено, петлевая обмотка называется также параллельной потому, что она образует параллельные ветви по числу полюсов машины.

Для пояснения сказанного разберем схему простой двухслойной петлевой обмотки, имеющей: число полюсов машины $2p = 2$; число секций обмотки $S = 6$; число пазов якоря $Z_э = 6$; число коллекторных пластин $K = 6$; первый шаг обмотки $y_1 = 2$; второй шаг $y_2 = 1$.

Исходя из этих данных, результирующий шаг обмотки

$$y = 2 - 1 = 1.$$

Шаг по коллектору $y_к = 1$.

Схема, на которой в разрезе изображена электрическая машина, называется радиальной (рис. 24). На ней активные стороны секций, уложенные в пазах якоря, обозначены кружками. Знаки в кружках показывают направление тока (плюс — от нас, точка — к нам). Соединения между проводниками за чертежом (задняя лобовая часть обмотки) показаны пунктирной линией. Стрелками показано направление тока в соединительных проводах. Соединение проводников с коллекторными пластинами дано

сплошными линиями. Для удобства разбора схемы пазы и коллекторные пластины пронумерованы порядковыми номерами.

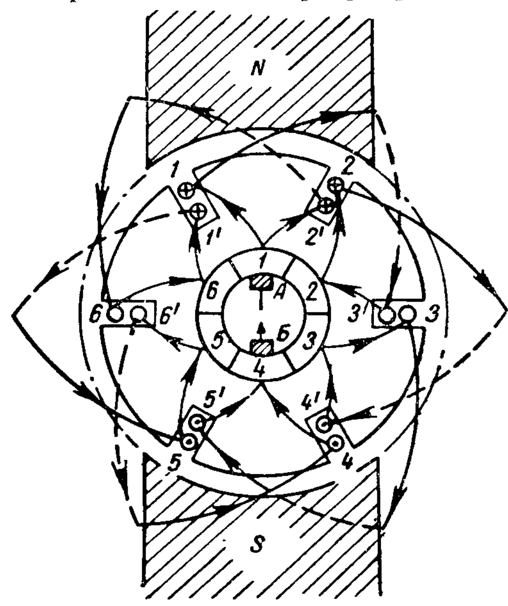


**Рис. 24. Радиальная схема петлевой обмотки**

Щетки устанавливаются на коллекторе по линии оси полюсов, чтобы на них можно было получить наибольшее напряжение (рис. 25).

Если проследить теперь направление э.д.с. в активных проводниках (сторонах) отдельных секций обмотки, то можно увидеть, что такая обмотка образует две параллельные ветви со встречным направлением э.д.с. в них. Величины э.д.с. в каждой параллельной ветви будут равны, так как ветви симметричны между собой и состоят из одинакового количества активных проводников. Попробуем изобразить это схематически (рис. 26). Проследим сначала чередование проводников в параллельной ветви, отходящей от щетки *А* в сторону провод-

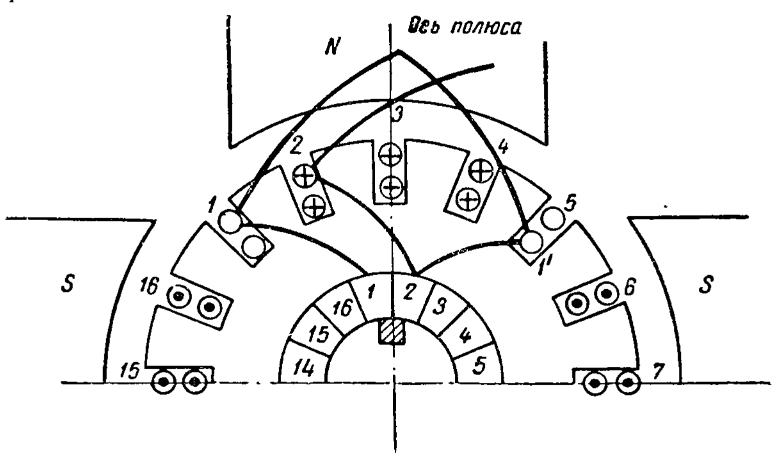


Рис. 25. Установка щеток на коллекторе

ника *1*, а затем параллельную ветвь, отходящую в сторону проводника *2'*. Э. д. с., наводимые в параллельных ветвях, складываются у коллекторной пластины *4*. Если к щеткам, соприкасаю-

щимся с коллекторными пластинами *1* и *4*, подключить внешнюю цепь, то по цепи пойдет ток в направлении от щетки *Б* к щетке *А*. Э.д.с. во внешней цепи будет равна э.д.с. одной параллельной ветви, так как общая э.д.с. при параллельном соединении нескольких источников тока всегда равна э.д.с. одного источника тока.

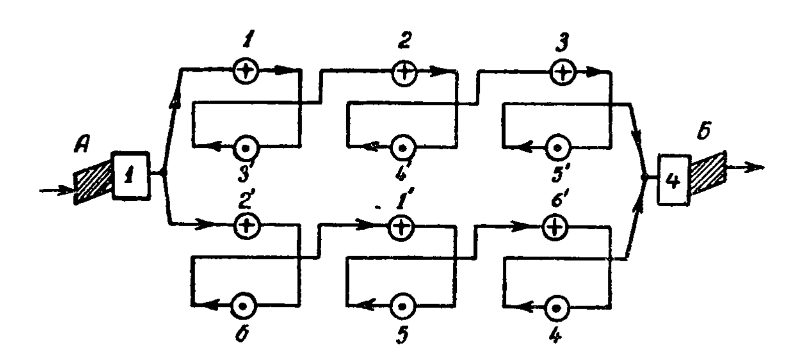



Рис. 26. Схема параллельных ветвей простой петлевой обмотки

Таким образом, обмотка данной машины состоит из двух параллельных ветвей, т. е. каждому полюсу машины соответствует одна параллельная ветвь.

Число параллельных ветвей обозначается $2a$. У простой петлевой обмотки число параллельных ветвей всегда равно числу полюсов машины, т. е.

$$2a = 2p. \qquad (14)$$

Эта зависимость является наиболее характерной особенностью простой петлевой обмотки.

Ток якоря равен сумме токов в параллельных ветвях обмотки.

На рис. 27 приведен пример выполнения простой петлевой обмотки с данными: $2\,p=4$, $S=K=24$.

Обмотка — правоходовая с диаметральным шагом. Исходя из данных, определяем первый и второй шаги обмотки:

$$y_к = 1; \quad y_1 = \frac{Z_э}{2p} = \frac{24}{4} = 6; \quad y = y_к = 1; \quad y_2 = y_1 - y = 6 - 1 = 5.$$

Для удобства построения обмотки пластины коллектора обозначаются номерами от 1 до 24. Первым номером обозначается пластина коллектора, к которой присоединяется начало первой секции. Секции также нумеруются порядковыми числами от 1 до 24. Так как каждая секция состоит из двух активных сторон, то за этими сторонами сохраняется та же нумерация, что и секций, толь-

ко начальную активную сторону обозначают цифрой 1, а ее конечную сторону — цифрой 1'. При такой системе номера пластины коллектора, секции и элементарного паза будут одинаковыми.

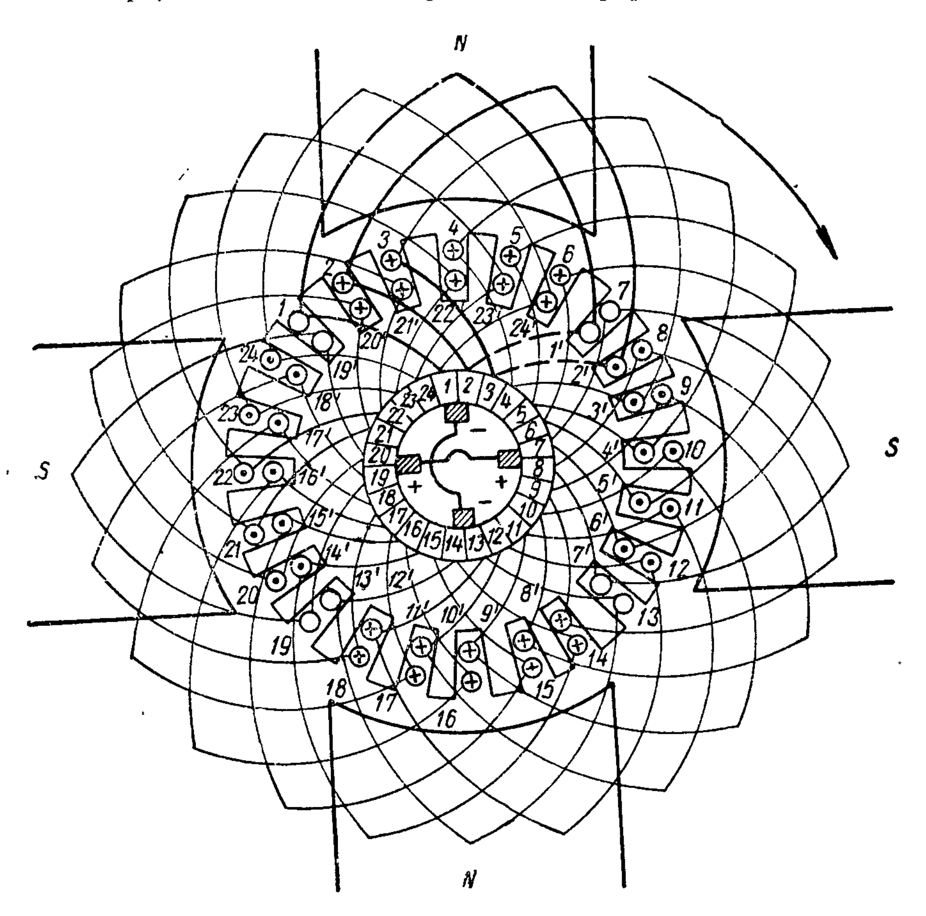



Рис. 27. Простая петлевая обмотка

Начальная сторона секции укладывается в верхнюю половину первого элементарного паза, а ее конечная сторона смещается относительно начальной стороны в соответствии с первым частичным шагом на шесть элементарных пазов и укладывается в нижнюю половину элементарного паза 7. Конец первой секции соединяется с коллекторной пластиной *2*, откуда берет начало вторая секция обмотки.

Начальная сторона второй секции обмотки укладывается в верхнюю половину элементарного паза *2*, а конечная сторона — в нижнюю половину элементарного паза *8*. Конец второй секции

присоединяется к коллекторной пластине *3*. Остальные секции обмотки укладываются в том же порядке.

Для наглядности схемы якорных обмоток обычно изображают в развернутом виде. Для этого обмотку мысленно развертывают на плоскости, сохраняя нумерацию полюсных делений и элементарных пазов. При этом принято обозначать начальные активные стороны секций, лежащие в верхней части паза, линией слева, а конечные стороны, лежащие в нижней части паза, — линией справа. Полюсы машины либо проектируются на плоскости в виде прямоугольников, находящихся над проводниками, либо показываются над развернутой схемой обмотки.

На рис. 28 дается развернутая схема простой петлевой обмотки, показанной на рис. 27. На этой схеме секции, замкнутые накоротко щетками, показаны жирными линиями.

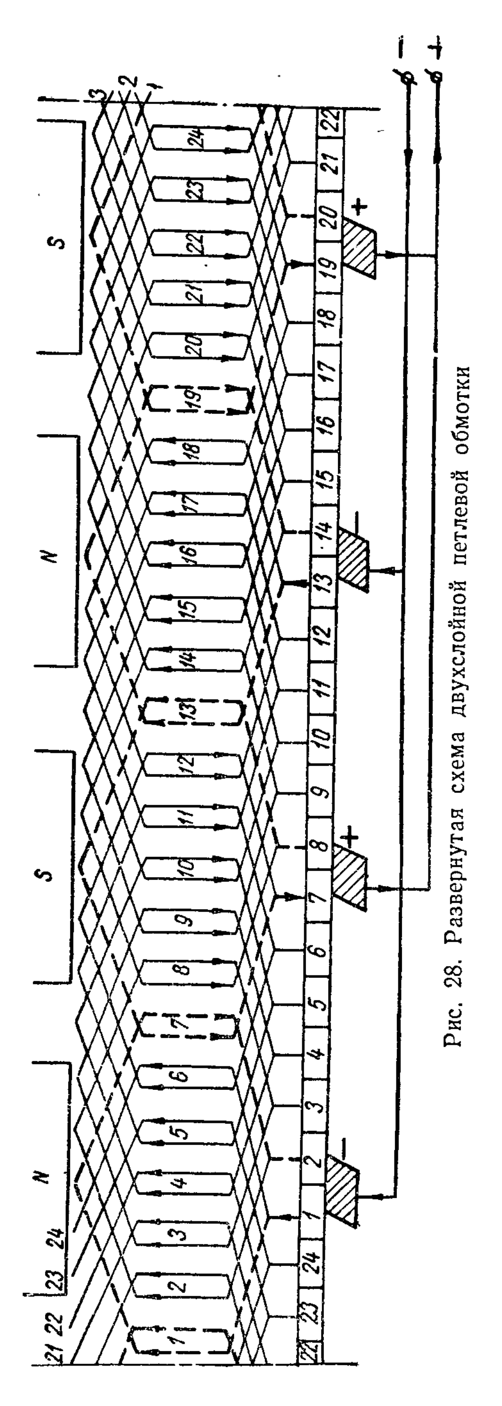


Рис. 28. Развернутая схема двухслойной петлевой обмотки

### § 8. ПРОСТАЯ ВОЛНОВАЯ (ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ) ОБМОТКА

Волновая обмотка выполняется в одном направлении, все время поступательно вперед по окружности якоря, и не имеет обратных ходов (рис. 29). Она также характеризуется первым и вторым частичными шагами $y_1$ и $y_2$, результирующим шагом $y$ и шагом по коллектору $y_к$. Если обмотка укладывается

в элементарные пазы, то число коллекторных пластин $K$ должно быть равно числу секций обмотки $S$ и числу элементарных пазов $Z_э$, т. е. $K = S = Z_э$.

Волновая обмотка называется простой, если в результате однократного обхода коллектора следующий обход по нему начинается с коллекторной пластины, находящейся рядом с исходной. При этом возможны два случая. Если повторный обход коллектора начинается с коллекторной пластины, не доходя до исходной, то такая обмотка называется неперекрещивающейся, или левоходовой. Если же повторный обход коллектора начинается с коллекторной пластины, лежащей за исходной, то такая обмотка называется перекрещивающейся, или правоходовой.

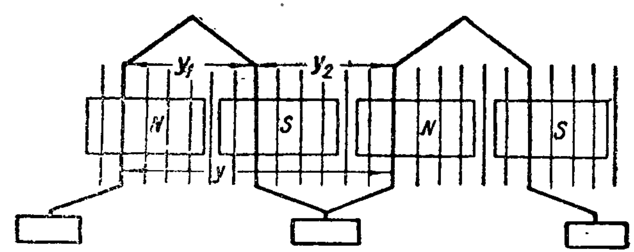



Рис. 29. Схема простой волновой обмотки

Первый частичный шаг и результирующий шаг простой волновой обмотки определяются так же, как и у простой петлевой обмотки. Они равны:

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \pm b, \qquad а \quad y = y_к.$$

Шаг по коллектору будет зависеть от того, является ли обмотка левоходовой или правоходовой. При левоходовой обмотке, когда повторный обход коллектора начинается с коллекторной пластины, не доходя до исходной, число пройденных коллекторных пластин будет равно $K-1$, а при правоходовой обмотке—$K+1$. При одном обходе коллектора будет уложено в пазы якоря число секций, соответствующее числу пар полюсов $p$, и будет сделано такое же число шагов по коллектору. Отсюда шаг по коллектору определится по формуле:

$$y_к = \frac{K \pm 1}{p}, \tag{15}$$

где:

$K$ — число пластин коллектора;

$p$ — число пар полюсов.

Результирующий шаг обмотки $y$ равен сумме первого и второго шагов, т. е.

$$y = y_1 + y_2, \qquad (16)$$

откуда второй частичный шаг обмотки определяется как разность между результирующим и первым шагом

$$y_2 = y - y_1.$$

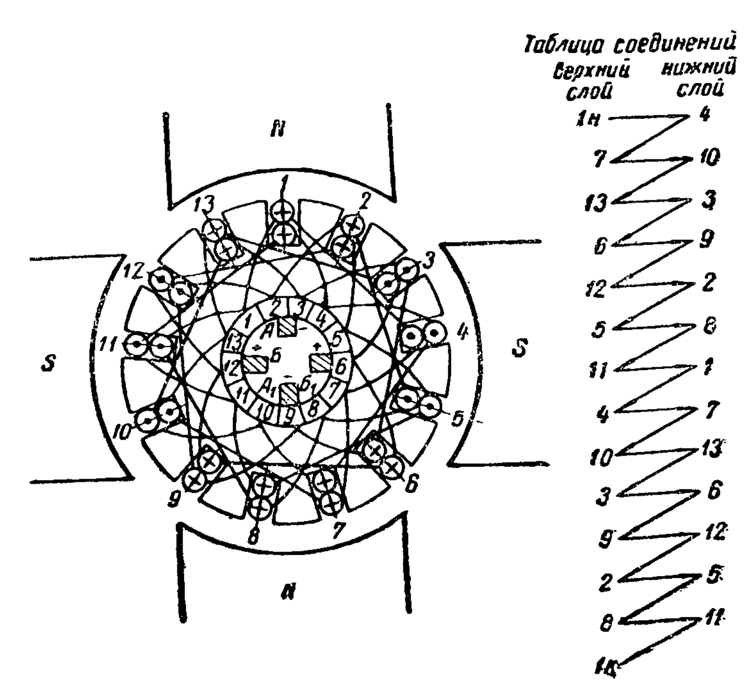



Рис. 30. Схема двухслойной простой волновой обмотки

Характерной особенностью волновой обмотки является то, что в ней соединяются последовательно друг с другом сначала все секции, находящиеся под северными полюсами, образуя одну параллельную ветвь, и затем все секции, находящиеся под южными полюсами, образуя вторую параллельную ветвь. Поэтому, независимо от числа пар полюсов, простая волновая обмотка всегда имеет только две параллельные ветви, т. е. $2a=2$.

На рис. 30 и рис. 31 даются схемы простой волновой обмотки с данными: $2p=4$; $S=K=Z_э=13$.

Исходя из этих данных, определяют шаг обмоток:

$$y_к = \frac{K-1}{p} = \frac{13-1}{2} = 6; \quad y_1 = \frac{Z_э}{2p} - b = \frac{13}{4} - \frac{1}{4} = 3;$$

$$y = y_к = 6; \qquad y_2 = y - y_1 = 6 - 3 = 3.$$

Нумерацию коллекторных пластин, секций и элементарных пазов производят по той же системе, как и при построении простой петлевой обмотки.

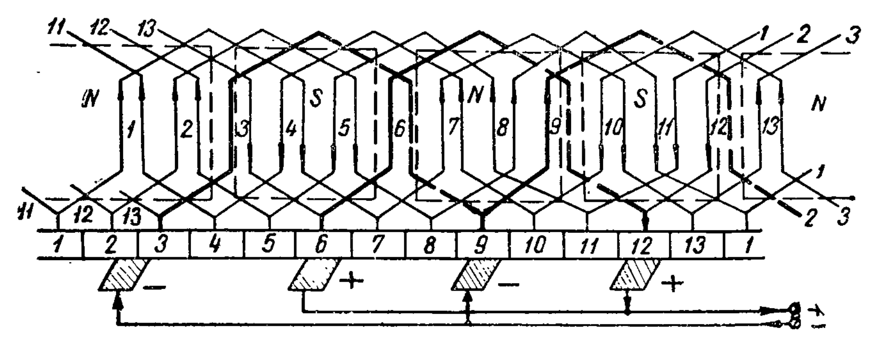



Рис. 31. Развернутая схема двухслойной простой волновой обмотки

При выполнении данной обмотки начальная сторона первой секции укладывается в верхнюю половину первого элементарного паза, а ее конечная сторона смещается относительно начальной стороны в соответствии с первым частичным шагом на три элементарных паза и укладывается в нижнюю половину элементарного паза *4*. Конец первой секции соединяется с коллекторной пластиной *7*, откуда берет начало вторая секция обмотки. Второй частичный шаг также равен трем, поэтому начальная сторона второй секции, будучи сдвинутой относительно конечной стороны первой секции на три элементарных паза, укладывается в верхнюю половину паза, а конечная ее сторона—в нижнюю половину элементарного паза *10*. Конец второй секции присоединяется к коллекторной пластине *10*. Остальные секции обмотки укладываются в том же порядке.

Порядок укладки активных сторон секции в элементарные пазы показывается в таблице соединений, которую всегда полезно составить перед началом выполнения обмотки.

На развернутой схеме этой обмотки секции, замкнутые накоротко щетками, показаны жирными линиями.

Как было отмечено выше, простая волновая обмотка, независимо от числа пар полюсов, всегда образует две параллельные ветви. Это позволяет устанавливать на коллекторе только две щетки. Однако обычно все же ставят полное число щеток в соответствии с числом полюсов, так как это позволяет снизить величи-

ну тока, приходящуюся на щеткодержатель, и уменьшить размеры коллектора. Кроме того, улучшаются условия симметрии обмотки. Если бы были установлены две щетки, то параллельные ветви обмотки состояли бы из разного числа секций (рис. 32). Предположим, что на коллекторе установлены только две щетки — *А* и *Б*. Тогда одна параллельная ветвь состояла бы из пяти сек-

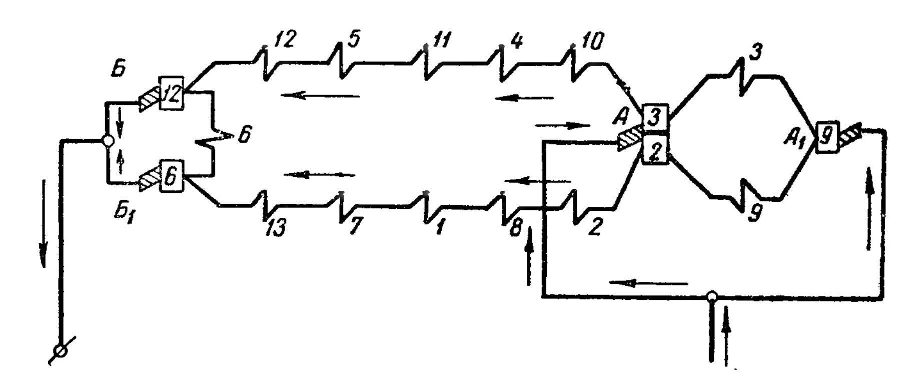



Рис. 32. Параллельные ветви волновой обмотки

ций — *12-5-11-4-10*, а вторая из шести секций — *6-13-7-1-8-2*, секции *3* и *9* были бы замкнуты накоротко щеткой *А*. При четырех щетках в каждой параллельной ветви содержится равное число секций — по пять секций, секция *6* замыкается накоротко — между щетками *Б* и $Б_1$, а секции *3* и *9* — между щетками *А* и $А_1$.

## § 9. СЛОЖНО-ПЕТЛЕВАЯ ОБМОТКА

Сложно-петлевая обмотка получается из нескольких (чаще всего двух) простых петлевых обмоток, уложенных в пазы якоря машины. Обмотки между собой независимы, и каждая из них замыкается сама на себя. В процессе работы они включаются параллельно друг другу при помощи щеток, которые по своей ширине перекрывают сразу две коллекторные пластины.

Сложно-петлевая обмотка обладает тем преимуществом, что она имеет вдвое большее (при двукратной обмотке) количество параллельных ветвей. Это позволяет получить значительно большую величину тока при сохранении его величины неизменной в каждой из параллельных ветвей.

Больший ток при простой петлевой обмотке может быть получен только при одновременном увеличении числа параллельных ветвей и числа пар полюсов машины.

В сложно-петлевой обмотке число параллельных ветвей не зависит от числа пар полюсов и всегда больше числа полюсов.

Число параллельных ветвей этой обмотки определяется из отношения

$$2a = 2pm, \qquad (17)$$

где:

$p$ — число пар полюсов машины;

$m$ — число простых петлевых обмоток, из которых слагается сложно-петлевая обмотка. Это число называется коэффициентом кратности.

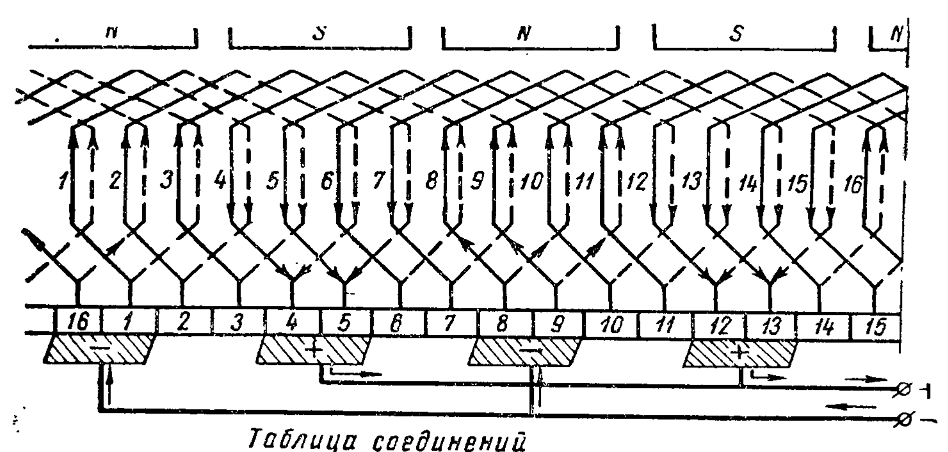



Таблица соединений

| Первая обмотка: верхний слой | Первая обмотка: нижний слой | Вторая обмотка: верхний слой | Вторая обмотка: нижний слой |
|---|---|---|---|
| 1н | 5 | 2н | 6 |
| 3 | 7 | 4 | 8 |
| 5 | 9 | 6 | 10 |
| 7 | 11 | 8 | 12 |
| 9 | 13 | 10 | 14 |
| 11 | 15 | 12 | 16 |
| 13 | 1 | 14 | 2 |
| 15 | 3 | 16 | 4 |
| 1к | | 2к | |

Рис. 33. Развернутая схема сложно-петлевой обмотки

Сложно-петлевая обмотка характеризуется, как и простая петлевая обмотка, шагом по коллектору, результирующим и частичными шагами.

Первый частичный шаг определяется по формуле

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \pm b.$$

Результирующий шаг $y = m$, шаг по коллектору $y_к = \pm m$. Так как обычно берут $m = 2$, то и $y_к = \pm 2$.

На рис. 33 дается развернутая схема сложно-петлевой обмотки с данными: $2p=4$; $S=K=16$; $m=2$.

Исходя из этих данных, получаем:

$$y=y_к=m=+2; \quad y_1=\frac{Z}{2p}\pm b=\frac{16}{4}\pm 0=4; \quad y_2=y_1-y=4-2=2;$$

$$2a=2pm=4\cdot 2=8.$$

Эта обмотка будет иметь восемь параллельных ветвей.

При выполнении обмотки, начиная с первой коллекторной пластины, окажутся соединенными между собой только нечетные пластины (*3-5-7-9-11-13-15*), после чего обмотка замкнется на первой коллекторной пластине, так как $m=2$. Для того чтобы использовать также и четные пластины, следует заложить в пазы якоря вторую параллельную первой и независимую от нее обмотку, концы которой будут присоединены к четным коллекторным пластинам *2-4-6-8-10-12-14-16*.

Такая обмотка называется **сложной двукратной петлевой обмоткой**.

## § 10. СЛОЖНО-ВОЛНОВАЯ ОБМОТКА

Сложно-волновая обмотка получается из нескольких простых волновых обмоток, соединенных между собой параллельно при помощи щеток. Электрические машины со сложно-волновой обмоткой позволяют получать повышенное напряжение при большой мощности.

Число параллельных ветвей равно удвоенному числу простых волновых обмоток.

$$2a=2m, \tag{18}$$

где $m$ — число простых волновых обмоток, составляющих сложно-волновую обмотку.

Расчет сложно-волновых обмоток производится так же, как и простых волновых обмоток. Шаг обмотки по коллектору определяется по формуле

$$y_к=\frac{K\pm a}{p}=\frac{K\pm m}{p}, \tag{19}$$

а шаг обмотки по пазам — по формуле

$$y_п=\frac{Z}{2p}\pm b. \tag{20}$$

На рис. 34 приводится развернутая схема сложно-волновой обмотки с данными: $2p=4$, $S=K=22$, $m=2$. По этим данным получаем:

$$y_1=\frac{Z_э}{2p}-b=\frac{22}{4}-\frac{2}{4}=5; \quad y_к=\frac{22\pm 2}{2}=10 \text{ или } 12;$$

$$y_2=y-y_1=10-5=5 \text{ или } 12-5=7.$$

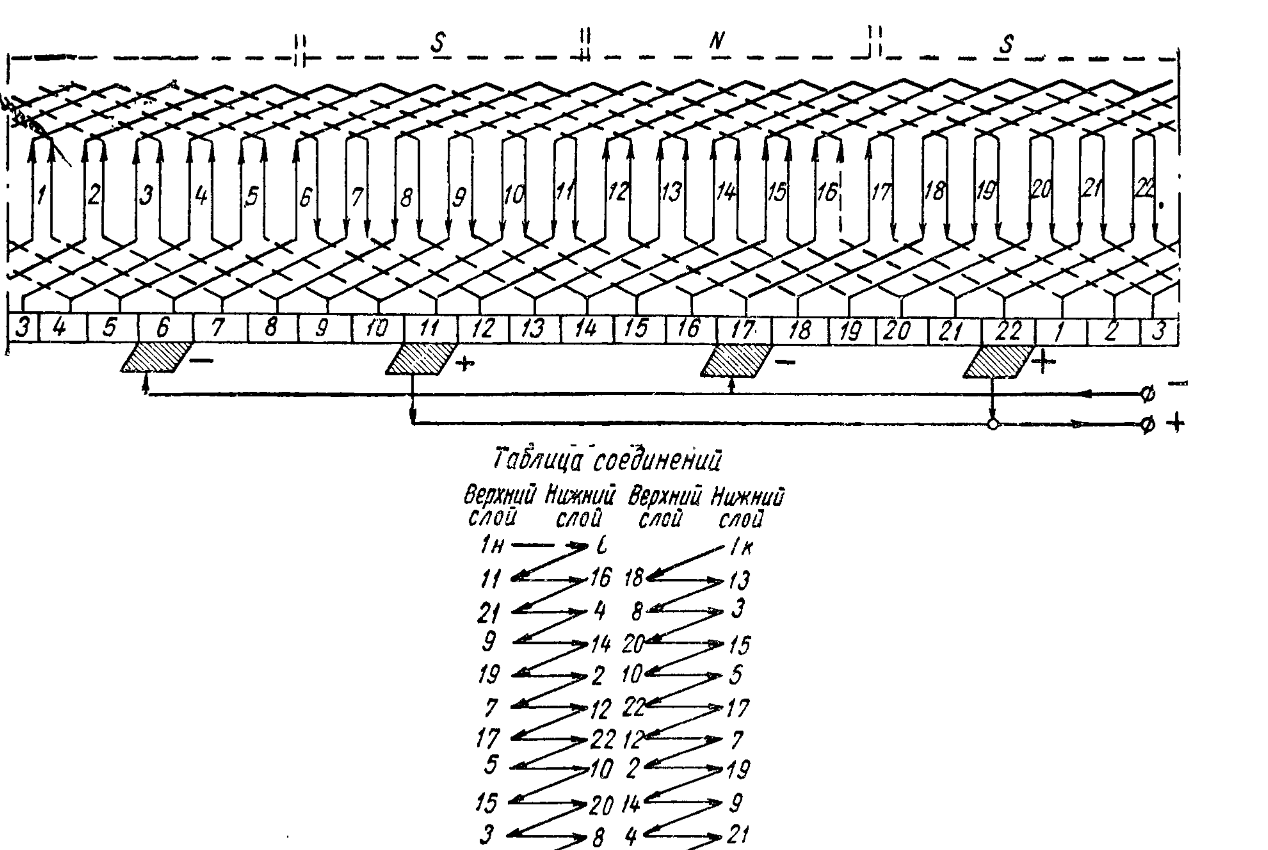



Рис. 34. Развернутая схема сложно-волновой обмотки

На этой схеме первый и второй шаги приняты равными пяти. Получившаяся обмотка является двукратнозамкнутой. Однако сложная волновая обмотка может быть и однократнозамкнутой, для этого нужно только, чтобы общее число коллекторных пластин $K$ и шаг по коллектору $y_к$ были взаимно простыми числами.

## § 11. КОМБИНИРОВАННАЯ (ЛЯГУШЕЧЬЯ) ОБМОТКА

Комбинированная (лягушечья) обмотка (рис. 35) представляет собой комбинацию сложно-волновой и петлевой обмоток, имеющих одинаковое число секций. При выполнении комбинированной обмотки в пазы якоря закладывают одновременно две обмотки: одну петлевую и другую волновую. Обе обмотки должны иметь одно и то же число витков в секции и параллельных ветвей. Число параллельных ветвей комбинированной обмотки вдвое больше числа полюсов.

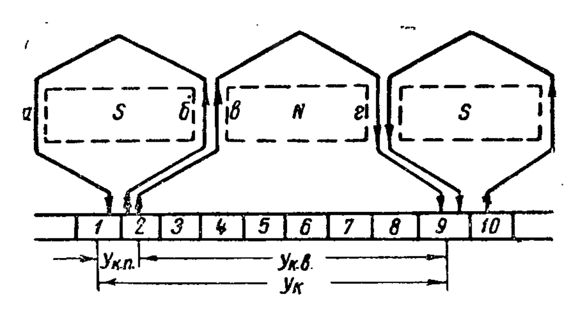



Рис. 35. Схема комбинированной (лягушечьей) обмотки

Концы секций обеих обмоток подводятся к одному и тому же коллектору. Поэтому к каждой коллекторной пластине присоединяются четыре проводника.

Коллекторные пластины равного потенциала связаны между собой соотношением

$$y_{к.п}+y_{к.в}=\frac{K}{p}, \qquad (21)$$

где:

$y_{к.п}$ — шаг по коллектору петлевой обмотки;

$y_{к.в}$ — шаг по коллектору волновой обмотки.

При этом условии сумма э. д. с., наводимой в контуре *а-б-в-г*, будет равна нулю.

Сумма шагов волновой и петлевой обмоток равна сумме пазов, приходящихся на пару полюсов,

$$y_{к.п}+y_{к.в}=\frac{Z}{p}. \qquad (22)$$

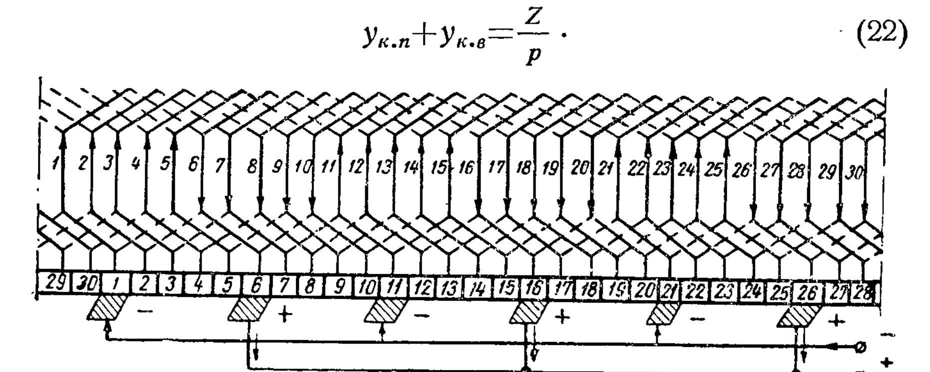



Рис. 36. Развернутая схема комбинированной (лягушечьей) обмотки

На рис. 36 приводится пример развернутой схемы комбинированной обмотки с данными: $Z_э=30$, $2p=6$, $K=30$, $y_1=5$, $y_2=4$ (для обеих обмоток).

## § 12. УСЛОВИЯ СИММЕТРИИ

Как следует из вышеуказанного, обмотка якоря всякой электрической машины состоит из $a$ пар параллельных ветвей. В каждой из этих параллельных ветвей создается э. д. с., но так как ветви соединены между собой параллельно, их общая э. д. с. будет равна э. д. с. одной параллельной ветви. Для получения одинаковых величин э. д. с. в параллельных ветвях обмотки и предотвращения появления уравнительных токов необходимо, чтобы обмотка машины удовлетворяла следующим условиям симметрии:

1) в каждой паре параллельных ветвей должно быть одинаковое число секций

$$\frac{S}{a}=\frac{K}{a}=\frac{Z_э}{a} \text{ (целое число)};$$

2) на каждую пару параллельных ветвей должно приходиться одинаковое число пазов

$$\frac{Z_э}{a} \text{ (целое число)};$$

3) каждая пара параллельных ветвей должна занимать одинаковое положение относительно системы полюсов, что может быть соблюдено при условии

$$\frac{2p}{a} \text{ (целое число)}.$$

## § 13. УРАВНИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Как было установлено, каждая якорная обмотка состоит из нескольких параллельных ветвей. Э. д. с. в параллельных ветвях должны быть одинаковы. Если этого не будет, то между параллельными ветвями неизбежно возникнут уравнительные токи, даже когда внешняя цепь отключена. Уравнительные токи вызывают усиленное искрение под щетками, что приводит к повреждению коллектора.

При нагрузке уравнительный ток складывается с током якоря, что ведет к неравномерному распределению токов в параллельных ветвях, увеличивает плотность тока под щетками и вызывает в процессе работы машины сильное искрение.

Причиной возникновения уравнительных токов при условии соблюдения симметрии обмотки чаще всего является неравенство магнитных потоков полюсов машины, что может быть вызвано неоднородностью материала магнитной цепи, наличием раковин в стали, различной величиной воздушного зазора в результате плохой сборки машины или срабатывания подшипников, плохой сборкой полюсов и т. п.

Чтобы освободиться от вредных последствий возникновения уравнительных токов, точки обмотки с теоретически равными потенциалами соединяют специальными проводниками с малым активным сопротивлением, называемыми **уравнительными соединениями** (уравнителями). Токи, протекающие по уравнительным соединениям, по своему характеру являются переменными. Они создают дополнительное магнитное поле, которое выравнивает магнитные потоки отдельных полюсов. Там, где магнитный поток основных полюсов ослаблен, например, вследствие увеличенного воздушного зазора, они его усиливают, в других случаях — ослабляют.

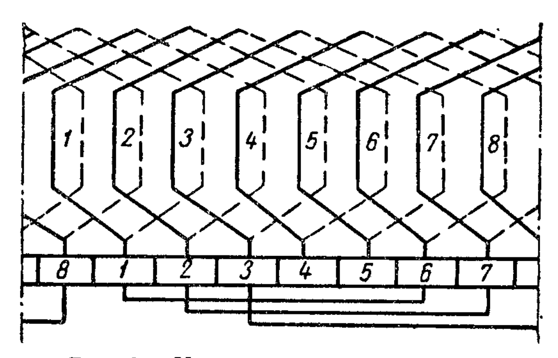


Рис. 37. Уравительные соединения по коллекторным пластинам

Точки присоединения уравнительных соединений выбирают в легко доступных местах: на коллекторе или на лобовых частях обмотки со стороны, противоположной коллектору (рис. 37).

Неравенство магнитных потоков особенно сильно сказывается в петлевых обмотках, так как каждая параллельная ветвь их расположена под своей парой полюсов. Без уравнительных соединений петлевая обмотка хорошо работать не может.

Каждая пара параллельных ветвей представляет собой как бы одну элементарную электрическую машину, имеющую только одну точку равного потенциала. Отсюда следует, что общее число точек одинакового потенциала будет равно числу пар параллельных ветвей $a$, т. е. $n_e = a$. Эти точки по окружности якоря распределены равномерно. Расстояние между указанными точками называется **потенциальным шагом** и измеряется либо числом секций обмотки, либо числом коллекторных делений, т. е.

$$y_{yp} = \frac{S}{a} = \frac{K}{a}, \qquad (23)$$

так как у петлевых обмоток $2a = 2p$.

Для машин, работающих в сравнительно легких условиях, практически нет необходимости выполнять все соединения, определяемые отношением $\frac{K}{a}$, так как это вызывает дополнительный расход меди. Достаточно бывает сделать лишь одну треть или половину всех возможных соединений. Тогда как для машин мощностью свыше 1000—1200 *квт* все коллекторные пластины соединяются уравнителями, у машин мощностью до 500 *квт* уравнительные соединения делаются через одну или через две коллекторные пластины, обычно по одному соединению на паз.

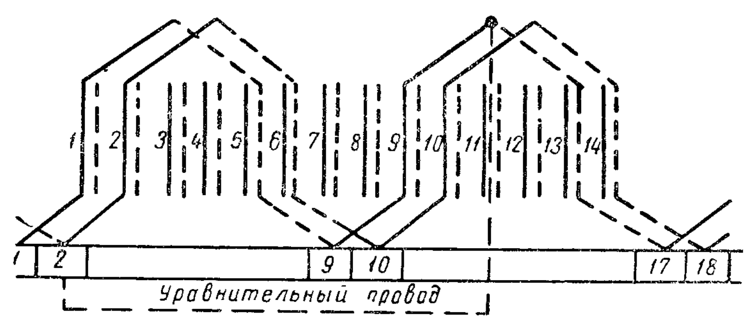



Рис. 38. Уравнительные соединения второго рода

Конструктивно уравнительные соединения выполняются либо под лобовыми частями обмотки, либо со стороны коллектора в виде кольцевых проводников.

У простых волновых обмоток, у которых $2a = 2$, уравнительные соединения вообще не могут быть сделаны.

Однако в сложно-волновых обмотках соседние коллекторные пластины относятся к различным параллельным ветвям и поэтому могут иметь неодинаковые потенциалы. В этих обмотках назначение уравнительных соединений состоит в выравнивании напряжения между коллекторными пластинами. Это достигается соединением между собой первой и второй обмоток (рис. 38). Такие соединения называются **уравнительными соединениями второго рода**.

## § 14. ВЫБОР ТИПА ОБМОТКИ

Выбор того или иного типа обмотки производится, исходя из следующих соображений:

1) величина тока в параллельной ветви якоря не должна превышать 500 *а*, во избежание сильного искрения под щетками;

2) число коллекторных пластин не должно быть чрезмерно большим; толщина пластин не должна быть менее 3,5 *мм* по условиям их механической прочности;

3) наименьшее количество коллекторных пластин должно определяться с таким расчетом, чтобы среднее напряжение между двумя соседними пластинами было не более 30 *в*.

В современных электрических машинах в зависимости от их мощности и напряжения применяют следующие виды обмоток:

1) простые петлевые — в малых двухполюсных машинах и многополюсных машинах мощностью 500 *квт* и более;

2) простые волновые — в машинах мощностью до 50 *квт* при 110 *в*, до 100 *квт* при 220 *в* и до 300 *квт* при 440 *в*;

3) сложно-петлевые — в машинах низкого напряжения;

4) сложно-волновые—в машинах мощностью 150—300 *квт* при 220 *в*;

5) комбинированные — в мощных машинах при больших величинах тока.

## § 15. ОБМОТКИ ГЛАВНЫХ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОЛЮСОВ

Обмотки главных полюсов являются обмотками возбуждения машины; они предназначаются для создания магнитного потока. В зависимости от схем соединения обмоток возбуждения с обмоткой якоря различают обмотки:

1) последовательного возбуждения, соединяемые с обмоткой якоря последовательно. Так как через эти обмотки проходит весь ток обмотки якоря, они выполняются с малым количеством витков и большого поперечного сечения;

2) параллельного возбуждения, соединяемые параллельно с обмоткой якоря. Эти обмотки имеют большое число витков и малое сечение провода;

3) комбинированного, или смешанного, возбуждения, состоящие из обмоток последовательного и параллельного возбуждения, из которых одна включается последовательно с обмоткой якоря, другая — параллельно ей. Обе обмотки наматываются на общий каркас (рис. 39).

Схемы обмоток возбуждения достаточно просты. Они также выполняются в развернутом виде на плоскости. Катушки (без различия числа витков) изображаются в виде прямоугольников в порядке чередования полюсов. Число катушек возбуждения равно числу полюсов. На схемах указываются направление токов (согласно полярности полюсов) и все соединения между катушками.

Максимальное число параллельных ветвей должно быть равно числу катушек. На рис. 40 приводятся примеры схем обмоток возбуждения.

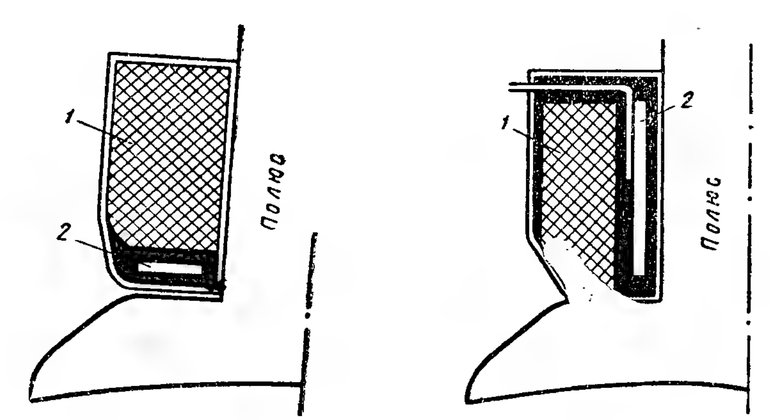



Рис. 39. Расположение обмоток параллельного и последовательного возбуждения на сердечнике главного полюса:

1—обмотка параллельного возбуждения; 2—обмотка последовательного возбуждения

Обмотки дополнительных полюсов создают дополнительные магнитные потоки, которые компенсируют поле поперечной реакции якоря в зоне коммутации.

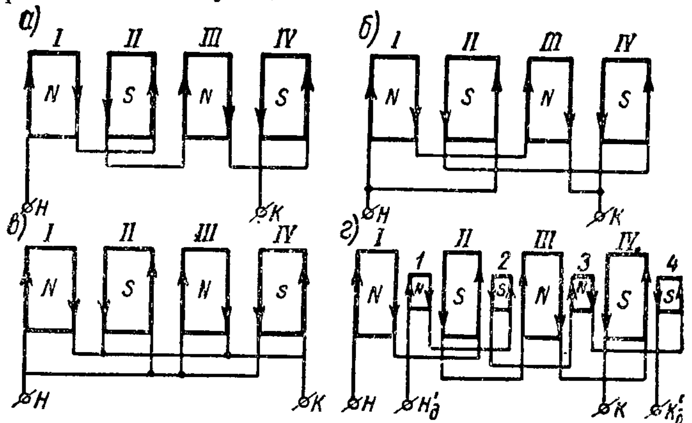



Рис. 40. Схемы соединения обмоток возбуждения:

*а*—последовательное соединение катушек; *б*—соединение катушек в две параллельные группы; *в*—соединение катушек в четыре параллельные группы; *г*—схема обмотки возбуждения с дополнительными полюсами

Ввиду того, что компенсирующее действие дополнительных полюсов должно быть пропорционально нагрузке, через обмотки дополнительных полюсов должен протекать ток якоря. Для этого необходимо, чтобы добавочные полюсы были ненасыщенными. Это

достигается соответствующим выбором сечения сердечников полюсов и числа витков обмотки.

При работе электрической машины в качестве генератора за

Таблица 2

| Режим работы машины | Чередование главных и дополнительных полюсов |
|---|---|
| Генераторный . . . . . . . | N-s-S-N-N-s-S-*N* |
| Двигательный . . . . . . . | *N*-*N*-S-s-*N*-*N*-S-s |

главным полюсом, следуя по направлению вращения якоря, устанавливается разноименный добавочный полюс, а при работе машины двигателем—одноименный дополнительный полюс (табл. 2).

## § 16. ПРАКТИЧЕСКОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ ОБМОТОК ЯКОРЯ

Практически обмотки якорей машин постоянного тока всегда выполняются двухслойными, т. е. в каждом пазу имеется четное число активных сторон, например начальная активная сторона одной секции и конечная активная сторона другой секции. В одном пазу может располагаться несколько пар сторон секций обмоток.

Секции якорной обмотки машин постоянного тока в подавляющем большинстве выполняются из обмоточных проводов с хлопчатобумажной изоляцией марок ПБД, ПЭЛБД, ПБДО, ПЭЛБО. Лишь у крупных и. специальных машин обмотка выполняется из шинной меди.

Обмотки машин постоянного тока могут выполняться различными способами. Секции могут наматываться непосредственно на сердечник якоря вручную или на специальных станках.

Широкое распространение имеет шаблонная обмотка, получившая свое название от специальных шаблонов для предварительного изготовления секций обмотки, которые затем укладываются в пазы.

При шаблонном изготовлении секций последние могут быть жесткими и мягкими. Жесткие секции имеют прессшпановую изоляцию в активной части, а мягкие секции такой изоляции не имеют.

Жесткие секции для повышения электрической прочности их изоляции пропитываются специальными пропиточными лаками с последующей сушкой. Мягкие секции изолируются, т. е. покрываются слоем лаколенты или микаленты. Особенно тщательно изолируются пазовые части секций, непосредственно соприкасающиеся с сердечником якоря.

Перед укладкой секций в пазы якоря острые края, кромки и заусенцы в пазах должны быть опилены, а стенки пазов—окрашены. Перед укладкой секций в пазы закладывается пазовая изоляция.

После укладки секций и их закрепления в пазах соединяют концы секций с коллекторными пластинками. При этом сначала соединяют с коллекторными пластинами нижние концы секций, а затем верхние.

Описанный способ укладки готовых секций в пазы якоря осуществим лишь при открытых пазах. При полуоткрытых пазах пазовая сторона секции целиком непосредственно в паз уложена быть не может из-за небольшой ширины прорези паза. В этом случае секции укладываются по одному проводнику. Такая обмотка называется «н а с ы п н о й».

При закрытых пазах готовые секции использованы быть не могут. В этом случае производится последовательная протяжка провода через соответствующие пазы или протяжка стержней в пазы с последующей пайкой соединений.

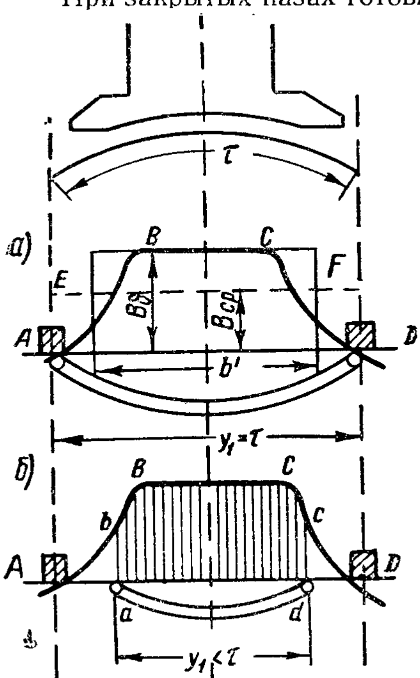



Рис. 41. Распределение магнитного потока под полюсом в воздушном зазоре

Катушки главных и дополнительных полюсов наматываются на каркас или шаблон. Каркас с катушкой надевается на полюс как одно целое.

Катушки главных полюсов выполняются обмоточным проводом круглого или прямоугольного сечения. Катушки дополнительных полюсов чаще всего делаются квадратной или прямоугольной формы из голой меди большого сечения.

## § 17. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА, НАВОДИМАЯ В ЯКОРЕ МАШИНЫ

Величина магнитной индукции в воздушном зазоре между полюсными наконечниками и якорем в различных точках по окружности якоря имеет неодинаковые значения. Наибольшую величину она имеет непосредственно под полюсными наконечниками и, начиная от их краев, быстро падает, а в точках, лежащих на нейтралях, равна нулю. В соответствии с этим и величина э. д. с., наводимой в проводниках обмотки якоря, изменяется от нуля до некоторого амплитудного значения.

Распределение магнитного потока под полюсом в воздушном зазоре характеризуется трапецеидальной кривой *ABCD* (рис. 41). Выразив площадь, охватываемую трапецеидальной кривой, равновеликим прямоугольником *AEFD*, основанием которого являет-

ся полюсное деление $\tau$, получим среднее значение магнитной индукции $B_{ср}$. Тогда средняя величина э.д.с., наводимой в активной части одного проводника, по закону электромагнитной индукции будет равна:

$$E_{ср}=B_{ср}l_a v, \tag{24}$$

где:

$E_{ср}$ — средняя величина э.д.с. в *в*;

$B_{ср}$ — средняя величина магнитной индукции в $\frac{в \cdot сек}{м^2}$;

$l_a$ — осевая длина активной части проводника в *м*;

$v$ — окружная скорость на поверхности якоря в *м/сек*.

Суммарная э. д. с. слагается из величин э. д. с., наводимых во всех последовательно соединенных проводниках одной параллельной ветви обмотки якоря.

Количество проводников, входящих в одну параллельную ветвь, определяется из отношения

$$N_{посл. \, пров}=\frac{N}{2a}, \tag{25}$$

где:

$N$ — общее число проводников обмотки;

$2a$ — число параллельных ветвей.

Отсюда общая величина э.д.с. обмотки якоря равна

$$E=E_{ср}\frac{N}{2a}. \tag{26}$$

Среднее значение магнитной индукции $B_{ср}$ может быть определено из формулы результирующего магнитного потока машины

$$\Phi=B_{ср}\tau l_a, \tag{27}$$

откуда

$$B_{ср}=\frac{\Phi}{\tau l_a} \quad \left[\frac{в \cdot сек}{м^2}\right], \tag{28}$$

где $\tau$ — полюсное деление.

Скорость вращения якоря определяется числом оборотов в минуту $n$. Если $2p$ число полюсов, полная окружность якоря будет равна $2p\tau$, а скорость определится по формуле:

$$v=\frac{2p\tau n}{60} \quad [м/сек]. \tag{29}$$

Подставляя полученные значения средней магнитной индукции и скорости в формулу средней э.д.с. в одном проводнике, получаем:

$$E_{ср}=B_{ср}l_a v=\frac{\Phi}{\tau l_a} l_a \frac{2p\tau n}{60}=\frac{2p}{60}n\Phi. \tag{30}$$

Откуда полная э. д. с. $E$ равна

$$E = E_{cp}\frac{N}{2a} = \frac{2pN}{60 \cdot 2a} n\Phi \ [в]. \quad (31)$$

В этой формуле магнитный поток $\Phi$ выражен в практических единицах — вольт-секундах (*в · сек*) или веберах (*вб*). Если же магнитный поток $\Phi$ будет выражен в абсолютных единицах максвеллах (*мкс*), то

$$E = \frac{2pN}{60 \cdot 2a} n\Phi \, 10^{-8} \quad [в]. \quad (32)$$

Для каждой определенной электрической машины величина $\frac{2pN}{60 \cdot 2a}$ — постоянная, она зависит исключительно от конструктивных данных машины: числа полюсов $2p$, числа параллельных ветвей $2a$, числа активных проводников $N$. Если эту величину выразить через постоянный коэффициент $k_e$, то

$$E = k_e n\Phi \ [в]. \quad (33)$$

В полученном выражении для генераторного режима — это действующая э. д. с., для двигательного режима—это противодействующая э.д.с.

## § 18. ВЕЛИЧИНА ВРАЩАЮЩЕГО (ТОРМОЗНОГО) МОМЕНТА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В каждой электрической машине между током в обмотке якоря и магнитным полем создается определенное взаимодействие, в результате которого на каждый проводник якоря действует средняя механическая сила, равная по закону электромагнитных сил

$$F_{cp} = B_{cp} I l_a.$$

Средняя величина магнитной индукции $B_{cp} = \frac{\Phi}{\tau l_a}$, а ток в последовательно соединенных проводниках каждой параллельной ветви равен

$$i = \frac{I_a}{2a}.$$

Откуда

$$F_{cp} = \frac{\Phi}{\tau l_a} \cdot \frac{I_a}{2a} l_a = \frac{\Phi I_a}{2a\tau}.$$

Средний электромагнитный момент, развиваемый проводником, равен

$$M_{ср}=F_{ср}R=\frac{\Phi I_a R}{2a\tau},$$

где $R$ — радиус якоря.

Полная длина окружности $2\pi R=2p\tau$, поэтому

$$\tau=\frac{\pi R}{p}.$$

Откуда

$$M_{ср}=\frac{\Phi I_a p}{\pi 2a}. \qquad (34)$$

Наконец, полный электромагнитный момент, развиваемый всеми проводниками $N$, равен:

$$M=M_{ср}N=\frac{pN\Phi I_a}{2a\pi} \quad [н \cdot м], \qquad (35)$$

Если в этой формуле магнитный поток $\Phi$ выражен в вольт-секундах или веберах, момент выражается в ньютон-метрах ($н \cdot м$) или джоулях ($дж$).

Если же магнитный поток выражен в максвеллах, момент выражается в килограммометрах ($кГм$). Так как 1 $кГ$ силы равен 9,81 ньютона, $M$ будет равен

$$M=\frac{pN}{2a\pi}\Phi I_a\frac{10^{-8}}{9{,}81} \quad [кГм]. \qquad (36)$$

В этих формулах выражения $\frac{pN}{2a\pi}$ и $\frac{pN}{2a\pi}\cdot\frac{10^{-8}}{9{,}81}$ величины постоянные и могут быть обозначены постоянным коэффициентом $k_м$. Тогда

$$M=k_м\Phi I_a. \qquad (37)$$

Для генераторного режима $M$ — это противодействующий или тормозящий момент, для двигательного режима — это действующий вращающий момент в килограммометрах.

Если учесть, что механическая мощность $P_{мех}$, выраженная в киловаттах, равна

$$P_{мех}=\frac{Mn}{975} \qquad (38)$$

(где $n$ — число оборотов в минуту), то после несложных преобразований получаем

$$P_{мех}=EI_a=P_э, \qquad (39)$$

где $P_э$ — электромагнитная мощность.

Это соотношение выражает закон сохранения энергии, преобразование механической энергии в электрическую и обратно, без учета тепловых потерь.

Как видно из предыдущего, $k_e$ и $k_м$ — постоянные величины и зависят исключительно от конструктивных данных машины. Между ними легко установить связь

$$k_e = \frac{2pN}{60 \cdot 2a} 10^{-8}, \qquad k_м = \frac{pN}{2a\pi} \cdot \frac{10^{-8}}{9,81},$$

откуда

$$\frac{k_e}{k_м} = \frac{2\pi \cdot 9,81}{60} \cong 1,03, \text{ или } \quad k_e \cong 1,03 k_м. \qquad (40)$$

*КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. Какие требования предъявляются к обмотке якоря?
2. Что представляет собой секция обмотки?
3. Какие различают схемы соединения обмоток якоря?
4. Как выполняется простая петлевая обмотка и каковы ее особенности?
5. Что называется первым и вторым частичными шагами обмотки, результирующим шагом и шагом по коллектору?
6. Чему должна быть равна ширина секции?
7. Чему равно число параллельных ветвей у простой петлевой обмотки?
8. Как выполняется простая волновая обмотка и каковы ее особенности?
9. Как образуются параллельные ветви в обмотках якоря?
10. Как выполняются двухслойные обмотки?
11. Что понимается под элементарным пазом?
12. Какие данные необходимы для составления схемы обмотки якоря?
13. Как выполняется сложно-петлевая обмотка и чем она отличается от простой петлевой обмотки?
14. Как выполняется сложно-волновая обмотка?
15. Какая обмотка называется «лягушечьей»?
16. Для чего делаются в обмотках якоря уравнительные соединения?
17. Чему равен шаг уравнительных соединений?
18. Как выполняются обмотки главных и дополнительных полюсов?
19. Какая обмотка называется шаблонной и как она выполняется?
20. Чему равна э.д.с., наводимая в обмотке якоря?
21. Как определяется момент вращения машины постоянного тока?
22. Какой момент развивается в генераторах и какой — в двигателях?

## *Глава III*

# МАГНИТНАЯ СИСТЕМА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

## § 19. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Для работы всякой электрической машины в ней должно быть создано магнитное поле, определяемое магнитной индукцией $B$.

Величина полного магнитного потока $\Phi$, необходимого для наведения в обмотке якоря заданой э. д. с., может быть определена из формулы э.д.с. (формула 31)

$$\Phi = \frac{E60a}{nNp} \; [в \cdot сек]$$

или

$$\Phi=\frac{E}{k_e n}\ [в\cdot сек]\ . \qquad (41)$$

Для получения этого магнитного потока надо определить магнитодвижущую силу (сокращенно м. д. с.) главных полюсов машины. Как известно

$$\Phi=\frac{Iw}{\Sigma R_м}=\mu HS=BS\quad [в\cdot сек], \qquad (42)$$

где:

$Iw=F_м$ — м. д. с. в $a$;

$\Sigma R_м$ — сумма магнитных сопротивлений отдельных участков сложной магнитной цепи $\left(R_м=\frac{l}{\mu S}\right)$;

$\mu$ — магнитная проницаемость в $\frac{гн}{м}$ (для вакуума или воздуха $\mu_0=4\pi 10^{-7}\frac{гн}{м}$). Магнитная проницаемость $\mu$ в практической системе единиц может быть выражена как произведение проницаемости вакуума $\mu_0$ и относительной проницаемости среды $\mu_r$, имеющейся в таблицах, т. е. $\mu=\mu_0\mu_r$;

$H$ — напряженность магнитного поля, измеряемая числом ампер на метр длины магнитной цепи;

$S$ — поперечное сечение магнитопровода в $м^2$;

$B$ — магнитная индукция в $\frac{в\cdot сек}{м^2}$.

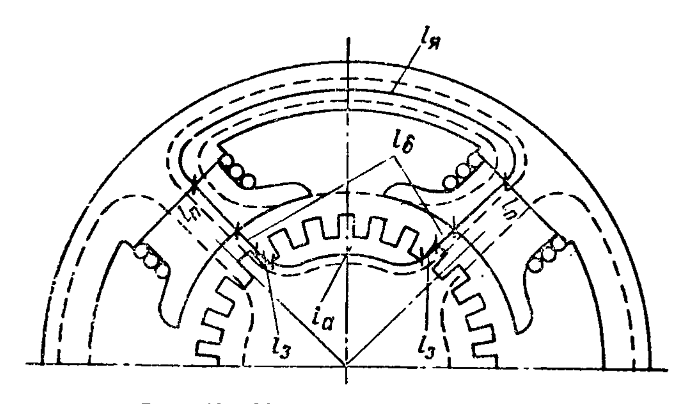



Рис. 42. Магнитная цепь машины

Из рис. 42 видно, что магнитный поток электрической машины замыкается через сердечники двух близлежащих разноименных главных полюсов машины, воздушный промежуток между полюсами машины и якорем, зубцы, сердечник якоря и станину.

Таким образом, магнитная цепь машины состоит из ряда последовательных участков, имеющих различные магнитные харак-

теристики. В замкнутой магнитной цепи различают следующие участки: воздушные зазоры (длина зазора $l_\delta$), зубцы якоря (высота зубцов $h_з$), сердечник якоря (длина участка $l_a$), сердечник полюса и полюсный наконечник (длина участка $l_m$), ярмо статора (длина участка $l_я$).

Все магнитные цепи (между разноименными полюсами машины) одинаковы. Расчет магнитных цепей по существу сводится к расчету магнитной цепи на одну пару полюсов.

При расчете следует учитывать, что не весь магнитный поток, создаваемый полюсами машины, участвует в наведении э.д.с. Некоторая его часть рассеивается, т. е. замыкается в пространстве, не пересекая проводников обмотки якоря. Эта часть магнитного потока называется **потоком рассеяния**.

Полный магнитный поток $\Phi_m$ в главном полюсе равен сумме потоков в воздушном зазоре $\Phi_\delta$ и рассеяния $\Phi_{рас}$.

$$\Phi_m = \Phi_\delta + \Phi_{рас} = \Phi_\delta \left(1 + \frac{\Phi_{рас}}{\Phi_\delta}\right). \tag{43}$$

Отношение полного магнитного потока $\Phi_m$ к магнитному потоку в воздушном зазоре $\Phi_\delta$ называется **коэффициентом рассеяния** $\sigma$

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{\Phi_{рас}}{\Phi_\delta}. \tag{44}$$

Откуда

$$\Phi_m = \Phi_\delta \sigma. \tag{45}$$

Коэффициент рассеяния полюсов при нагрузке для наиболее распространенных типов машин постоянного тока равен $\sigma = 1{,}08 - 1{,}25$.

М.д.с. по заданному магнитному потоку и длине участка магнитной цепи определяют в следующем порядке:

1) находят магнитную индукцию для данного участка цепи

$$B = \frac{\Phi_m}{S} \quad \left[\frac{в \cdot сек}{м^2}\right];$$

2) определяют по кривым намагничивания для данного участка м. д. с. на 1 единицу длины

$$H = \frac{wI}{l} \quad [а/м];$$

3) определяют суммарную м. д. с. во всей магнитной цепи, необходимую для создания заданного магнитного потока

$$F_0 = 2(Iw) = \Sigma Hl [а].$$

При расчете магнитной цепи чаще всего м. д. с. на единицу длины измеряют в амперах на сантиметр, длину участка — в сантиметрах.

Произведение м. д. с. на одну единицу длины на длину участка даст м. д. с. в амперах, необходимую для проведения магнитного потока через этот участок магнитной цепи.

Так как магнитный поток пронизывает последовательно все участки магнитной цепи, то общая м. д. с. на пару полюсов равна сумме м. д. с. отдельных участков цепи, а именно

$$F_0=2F_\delta+2F_з+F_a+2F_m+F_я, \qquad (46)$$

где:

$F_\delta$ — м. д. с., необходимая для проведения потока через воздушный зазор;

$F_з$ — м. д. с., необходимая для проведения потока через зубец якоря;

$F_a$ — м. д. с., необходимая для проведения потока через сердечник якоря;

$F_m$ — м. д. с., необходимая для проведения потока через сердечник главных полюсов и полюсный наконечник;

$F_я$ — м. д. с., — необходимая для проведения потока через ярмо станины.

М. д. с. машины вычисляют по формуле

$$F_{маш}=pF_0, \qquad (47)$$

где:

$p$ — число пар полюсов;

$F_0$ — м. д. с. одной магнитной цепи.

При первоначальном расчете машины обычно задаются определенными значениями магнитной индукции для отдельных участков магнитной цепи и по ним находят м. д. с. отдельных участков и общую м. д. с. на пару полюсов $F_0$, а затем и м. д. с. машины. Для упрощения примем, что геометрические размеры всех участков цепи и величина основного потока $\Phi_\delta$ заданы.

## М. д. с. воздушного зазора

Магнитная индукция в воздушном зазоре на полюсном делении и по длине якоря распределяется неравномерно. Для полюсного деления она характеризуется трапецеидальной кривой (рис. 43). При расчетах трапецеидальную кривую заменяют равновеликим ей прямоугольником, высота которого $B_\delta$ соответствует наибольшей индукции в зазоре. Основание прямоугольника $b_i$ называется р а с ч е т н о й  п о л ю с н о й  д у г о й. Так как это основание меньше полюсного деления, то вводят понятие расчетного коэффициента перекрытия $\alpha_i$, равного

$$\alpha_i=\frac{b_i}{\tau}. \qquad (48)$$

Величина этого коэффициента у машин постоянного тока с добавочными полюсами составляет $\alpha_i = 0{,}5$—$0{,}72$. Площадь, охватываемую кривой, характеризующей распределение магнитной индукции по длине якоря, также заменяют равновеликим прямоугольником с высотой, равной $B_\delta$, и основанием, являющимся расчетной длиной якоря $l_i$.

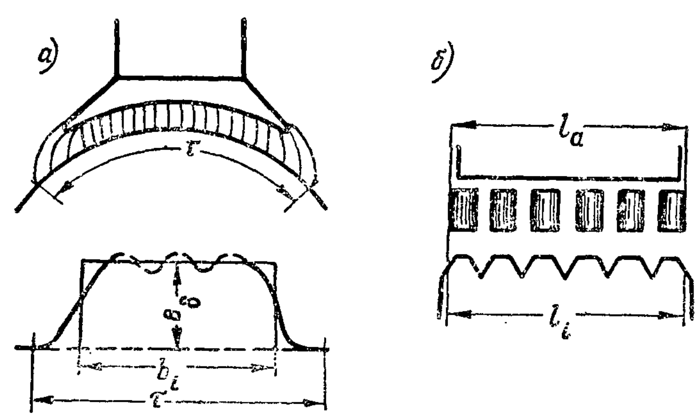



Рис. 43. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре на полюсном делении (*а*) и по длине якоря (*б*)

Эта расчетная длина якоря может быть определена по формуле

$$l_i = l_a - {}^1/_2 n_s b_s, \tag{49}$$

где:

$l_a$ — полная длина якоря;

$b_s$ — ширина одного вентиляционного канала;

$n_s$ — число радиальных вентиляционных каналов.

В машинах с осевой вентиляцией $l_i = l_a$. Исходя из сделанных приведений, величина магнитного потока в воздушном зазоре может быть вычислена по формуле

$$\Phi_\delta = B_\delta l_i b_i = B_\delta \alpha_i \tau l_i. \tag{50}$$

Откуда

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\alpha_i \tau l_i} = \frac{\Phi_\delta}{S_\delta},$$

где $S_\delta$ — сечение в воздушном зазоре, равное $S_\delta = \alpha_i l_i \tau$ [*см*²].

В зубчатом якоре магнитный поток в зазоре распределяется неравномерно: у поверхности зубцов плотность магнитных силовых линий больше, а в пазах меньше. Эта неравномерность рас-

пределения магнитного потока на поверхности якоря учитывается коэффициентом зубчатости $k_\delta > 1$, величина которого может быть определена по эмпирической формуле

$$k_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{з1} + 10\delta}, \qquad (51)$$

где $t_1$ — зубцовый шаг: $t_1 = \frac{\pi D_a}{Z}$;

$b_{з1}$ — ширина зубца по наружному диаметру.

Вводя коэффициент зубчатости, воздушный зазор $\delta$ приводят к некоторому расчетному зазору $\delta'$, который будет несколько больше действительного зазора

$$\delta' = k_\delta \delta. \qquad (52)$$

Зная все расчетные величины, можно найти м. д. с. воздушного зазора на пару полюсов, которая будет равна

$$2F_\delta = H_\delta l_\delta = 2\delta' H_\delta = 0{,}8B_\delta 2\delta' = 1{,}6B_\delta \delta'. \qquad (53)$$

$2\delta' = l_\delta$, так как расчет ведется на пару полюсов.

### М. д. с. зубцов якоря

В зоне зубцов магнитный поток $\Phi_0$ частично проходит по зубцам, частично — по пазам. В тех случаях, когда наибольшая магнитная индукция в зубце $B_{знб} > 18\,000$ *гс*, пренебрегать частью магнитного потока, проходящего по пазу, нельзя, и расчет приходится вести с учетом этой части магнитного потока.

Расчет м. д. с. зубцов может производиться на один зубцовый шаг, так как все зубцы на протяжении расчетной полюсной дуги находятся в одинаковых условиях.

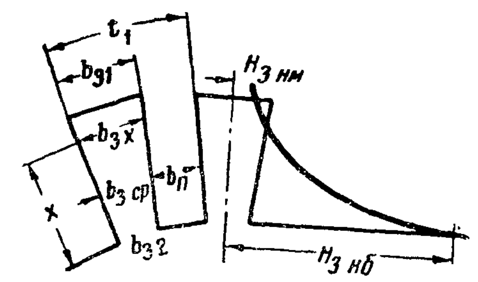


Рис. 44. Распределение напряженности магнитного поля в зубце

При расчете следует учитывать, что сечение зубца по его высоте неодинаково, и магнитные индукции в зубце приходится определять для различных сечений по высоте зубца. Обычно для расчета достаточно взять три сечения зубца: верхнее, нижнее и среднее (рис. 44).

Проще всего расчет вести по кривым зависимости действительной индукции в зубце $B'_з$ от соответствующей ей м. д. с. на одну единицу длины $H_з[B'_з = f(H_з)]$ для различных значений зубцового коэффициента.

Зубцовый коэффициент определяется исключительно геометрическими размерами зубца и паза. Этот коэффициент может быть найден из соотношения

$$k_з=\frac{S_п}{S_{з.x}}=\frac{t_x l_i}{b_{зx} l k_c}-1, \qquad (54)$$

где:

$S_п$ — поперечное сечение паза;

$S_{з.x}$ — поперечное сечение зубца;

$t_x$ — зубцовый шаг;

$l_i$ — расчетная длина якоря;

$b_{з.x}$ — ширина зубца;

$l=l_a-n_з b_з$ — длина железа якоря без вентиляционных каналов;

$k_c$ — коэффициент заполнения стали, учитывающий влияние изоляции листов стали; $k_c$=0,90 – 0,95;

$x$ — определяет расстояние сечения зубца от его основания (см. рис. 44).

Магнитный поток в зазоре из расчета на один зубцовый шаг $t_1$ равен

$$\Phi_t=B_\delta t_1 l_i. \qquad (55)$$

Так как расчет магнитных индукций по кривым ведется из условия, что по зубцу проходит весь магнитный поток, то

$$\Phi_t=\Phi_{з.x} \text{ или } B'_{з.x} b_{з.x} l k_c=B_\delta t_1 l_i.$$

Откуда

$$B'_{з.x}=B_\delta \frac{t_1 l_i}{b_{з.x} l k_c}. \qquad (56)$$

Исходя из этой формулы, определяют магнитные индукции для различных сечений зубца, где

$$B'_{з.нм}=B_\delta \frac{t_1 l_i}{b_{з1} l k_c}; \qquad (57)$$

$$B'_{з.нб}=B_\delta \frac{t_1 l_i}{b_{з2} l k_c}; \qquad (58)$$

$$B'_{з.ср}=B_\delta \frac{t_1 l_i}{b_{з.ср} l k_c}. \qquad (59)$$

Зная $B'_{з.нм}$, $B'_{з.нб}$, $B'_{з.ср}$, $k_{з.нм}$, $k_{з.нб}$ и $k_{з.ср}$ по кривым (рис. 45) определяют м. д. с. на одну единицу длины: $H_{з.нм}$, $H_{з.нб}$ и $H_{з.ср}$.

Расчетное значение м. д. с. в зубце $H_з$ вычисляется по формуле

$$H_з=\frac{H_{з.нм}+4H_{ср}+H_{з.нб}}{6}. \qquad (60)$$

Наконец, м. д. с. зубца на пару полюсов находится по формуле

$$2F_з = 2H_з h_з, \tag{61}$$

где $h_з$ — высота зубца.

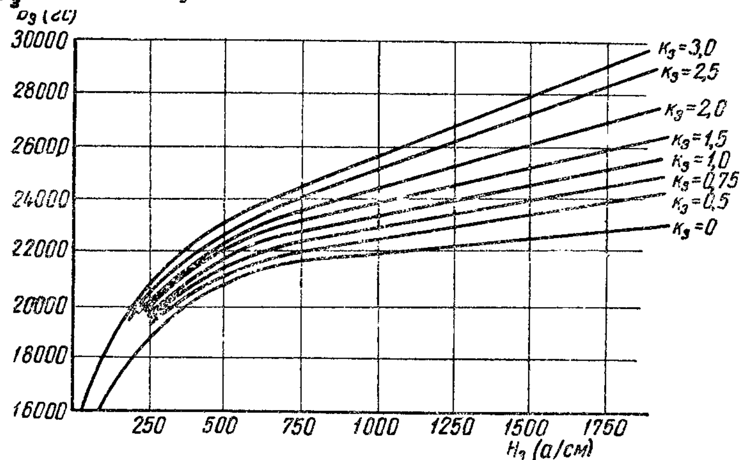



Рис. 45. Кривые $B_з' = f(H_з)$ для различных значений $к_з$

## М. д. с. сердечника якоря

Магнитный поток в сердечнике якоря равен

$$\Phi_a = \frac{\Phi_\delta}{2} = \frac{\Phi_m}{2\sigma} = B_a S_a. \tag{62}$$

Площадь поперечного сечения сердечника якоря $S_a$ равна

$$S_a = h_a l k_c, \tag{63}$$

где $h_a$ — высота сердечника якоря.

Из этой формулы индукция в сердечнике якоря определится из отношения

$$B_a = \frac{\Phi_\delta}{2S_a} = \frac{\Phi_\delta}{2h_a l k_c}. \tag{64}$$

М. д. с. на одну единицу длины $H_a$ определяется по кривым намагничивания для электротехнической стали.

Зная м. д. с. на одну единицу длины $H_a$, длину средней линии в стали сердечника $L_a$, можно определить и м. д. с. сердечника якоря

$$F_a = H_a L_a, \tag{65}$$

где

$$L_a \approx \frac{\pi}{2p}(D_a - 2h_з - h_a).$$

### М. д. с. полюсов и ярма

Расчет м. д. с. полюсов и ярма аналогичен расчету м. д. с. сердечника якоря. Он выполняется по формулам

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_m} = \frac{\Phi_m}{b_m l_m k_m} \qquad (66)$$

и

$$B_я = \frac{\Phi_m}{2S_я} = \frac{\Phi_m}{2h_я b_я}, \qquad (67)$$

где:

$S_m$ — сечение полюса;
$b_m$ и $l_m$ — соответственно ширина и длина полюса;
$k_m$ — коэффициент прослойки железа;
$S_я$ — сечение ярма;
$h_я$ и $b_я$ — соответственно высота и длина ярма.

По вычисленным магнитным индукциям определяют по кривым намагничивания соответствующие м. д. с. на одну единицу длины $H_m$ и $H_я$ и по ним — м. д. с. полюса и ярма по формулам

$$2F_m = 2H_m l_n, \qquad (68)$$

$$F_я = H_я L_я. \qquad (69)$$

### Магнитные индукции отдельных участков магнитной цепи

В тех случаях, когда геометрические размеры отдельных участков магнитной цепи не заданы, их расчет производится исходя из определенных значений магнитной индукции на основании опыта электромашиностроения.

Так, величина магнитной индукции $B_\delta$ в зазоре принимается равной в пределах 4000—10500 *гс*. Она изменяется в зависимости от диаметра якоря в пределах, указанных в табл. 3.

Таблица 3

| Диаметр якоря в *см* | 10 | 20 | 40 | 80 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| $B_\delta$ в (*гс*) | 4000 | 6000 | 8000 | 9500 | 10000—10500 |

Магнитная индукция на других участках магнитной цепи выбирается в пределах:

а) в зубцах якоря — 18 000—23 000 *гс*;
б) в сердечнике якоря — 11 000—15 000 *гс*;
в) в ярме (из стали) — 10 000—14 000 *гс* и вдвое меньше в ярме из чугуна;
г) в сердечнике полюса — 12 000—16 000 *гс*.

## Кривая намагничивания машины

По величинам магнитного потока $\Phi_\delta$ и м. д. с. $F_0$ магнитной цепи может быть построена кривая намагничивания машины (рис. 46).

Для этого задаются рядом значений $\Phi_\delta$ или $E_0$ в пределах от 0,5 $E_0$ до 1,25 $E_0$ и вычисляют соответствующие значения $F_0$, по которым строят зависимость $\Phi_\delta = f(F_0)$. Полученная кривая и является кривой намагничивания машины или, при постоянной скорости вращения, кривой холостого хода.

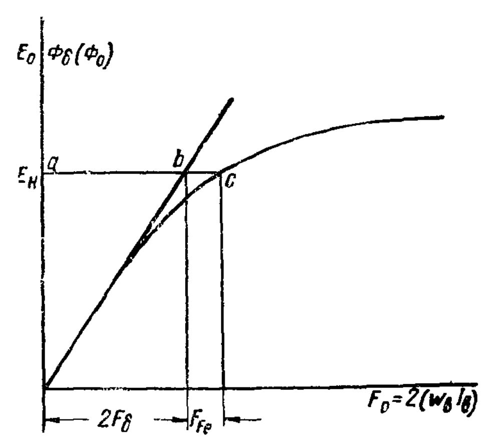



Рис. 46. Кривая намагничивания машины

Нижняя часть кривой соответствует ненасыщенному состоянию стали участков магнитной цепи. Можно считать, что в этой части кривой м. д. с. $F_0$ равна м. д. с. воздушных зазоров $2F_\delta$ .

При увеличении $\Phi_\delta$ начинает сказываться насыщение стали участков магнитной цепи, и все бóльшая часть м. д. с. тратится на проведение потока по стали. Эта часть определяется отрезком $bc$. По отношению $\frac{ab+bc}{ab}$ можно судить о степени насыщения стали.

Исходя из величины м. д. с. $F_0$ и задавшись величиной тока возбуждения, определяют число витков обмотки возбуждения по формуле

$$w_в I_в = \frac{F_0}{2}, \tag{70}$$

где:

$I_в$ — ток возбуждения в $a$;

$w_в$ — число витков обмотки возбуждения (на одном полюсе).

Площадь поперечного сечения обмотки возбуждения вычисляется по формуле

$$S_в = \frac{I_a}{\Delta_в} \quad [мм^2], \tag{71}$$

где $\Delta_в$ — плотность тока; $\Delta_в = 1—3$ $[a/мм^2]$.

## § 20. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

Основное магнитное поле создается главными полюсами машины. Однако это правильно лишь в том случае, когда машина не нагружена, т. е. работает на холостом ходу и нет тока в обмотке якоря. Когда же к обмотке якоря подключена внешняя сеть и по ней проходит электрический ток, вокруг обмотки якоря создается магнитное поле, называемое полем якоря. Поле якоря, взаимодействуя с основным магнитным полем, образует результирующее магнитное поле. Воздействие м.д.с. якоря на м.д.с. основных полюсов называется реакцией якоря.

М. д. с. обмотки якоря может быть выражена через линейную нагрузку якоря.

Под линейной нагрузкой якоря понимают число амперпроводников обмотки якоря, приходящееся на погонный сантиметр длины окружности якоря, т. е.

$$AS = \frac{i_a N}{\pi D_a}, \tag{72}$$

где:

$i_a$ — величина тока в параллельной цепи в $a$; $i_a = \frac{I_a}{2a}$ (здесь $I_a$ — величина тока в якоре);

$N$ — число всех проводов обмотки якоря;

$N = N_n Z$ (здесь $N_n$ —число проводов в пазу, $Z$ — число пазов);

$D_a$ — внешний диаметр якоря в *см*.

Линейная нагрузка у машин малой мощности составляет 65—200 *а/см* (при $D_a$ = 8—15 *см*) у машин большой мощности — 260—420 *а/см* (при $D_a$ = 20—100 *см*).

Магнитное поле полюсов неподвижно, в то время, как магнитное поле якоря может перемещаться и его положение связано с положением щеток относительно геометрической нейтрали. Геометрической нейтралью называется прямая, проходящая через центр окружности якоря и перпендикулярная к оси полюсов (рис. 47, *а*). При положении щеток на геометрической нейтрали *XX* поле якоря, направленное перпендикулярно к оси полюсов, называется поперечным полем и определяется поперечной м. д. с. якоря на пару полюсов.

Наложение поля якоря на основное поле машины, создаваемое главными полюсами, показано на диаграммах, приведенных на рис. 47, *а*, *б* и *в*. На рис. 47, *а* показано поле возбуждения, создаваемое полюсами при отсутствии тока в обмотке якоря. Магнитный поток распределяется симметрично относительно оси полюсов. Направление вращения якоря принято по часовой стрелке (генераторный режим).

В соответствии с заданным вращением на рис. 47, *б* показано направление э.д.с., наводимой в проводниках якоря при пересечении ими основного магнитного поля. На рис. 47, *б* дано распределение потока якоря при прохождении по его обмотке тока в направлении, совпадающем с направлением э.д.с. Поле якоря располагается симметрично относительно геометрической нейтрали.

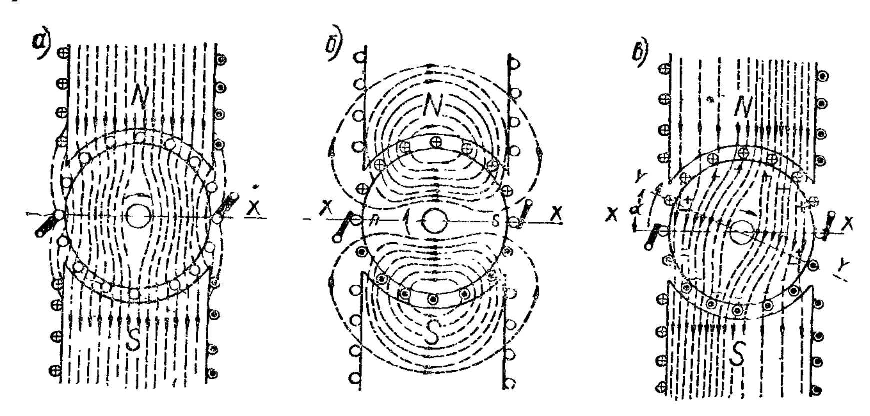



Рис. 47. Реакция якоря

Направление магнитных силовых линий обеих частей поля одинаково, они выходят с одной стороны якоря и входят в него с другой стороны. Это определяет полярность поля. Осевая линия поля якоря совпадает с линией щеток. Перемещение линии щеток с нейтрали влечет за собой и смещение осевой линии поля якоря.

На рис. 47, *в* показано результирующее поле машины, образующееся вследствие наложения поля якоря на поле полюсов (возбуждения). Его форма в сравнении с основным магнитным полем искажена. С одной стороны полюса магнитные силовые линии как бы набегают на якорь машины, и этот участок поля называется набегающим краем поля, с другой стороны полюса магнитные силовые линии как бы сбегают с якоря, и этот участок поля называется сбегающим краем.

Физическая нейтраль $Y—Y$ смещается в сторону вращения якоря в случае генераторного режима. Физической нейтралью называется прямая, проходящая через центр окружности якоря и точки, где индукция равна нулю при наличии тока в якоре.

Как известно, щетки располагаются на коллекторе так, что они перемыкают соседние коллекторные пластины в тот момент, когда присоединенная к ним секция находится в плоскости физической нейтрали и э.д.с. в ней равна нулю.

При смещении физической нейтрали перемыкание щеткой соседних коллекторных пластин будет происходить в тот момент, когда в проводниках секции наводится э. д. с. (полярность указана

внутри окружности). Под щетками возникает искрение тем значительнее, чем больше будет угол смещения физической нейтрали.

При смещении щеток с геометрической нейтрали на угол 90°, т. е. на $\frac{\tau}{2}$ по направлению вращения якоря, переместится и ось поля якоря и расположится вдоль оси полюсов (см. рис. 46).

Такое поле называется продольным и определяется продольной м. д. с. на пару полюсов:

$$F_{пр}=AS\tau.$$

При смещении щеток с геометрической нейтрали на некоторый угол $\beta$ (рис. 48) одна часть витков обмотки якоря в пределах угла $\alpha$ создает магнитное поле с поперечной м. д. с. якоря, другая часть витков обмотки якоря в пределах угла $2\beta$ образует магнитное поле с продольной м. д. с.

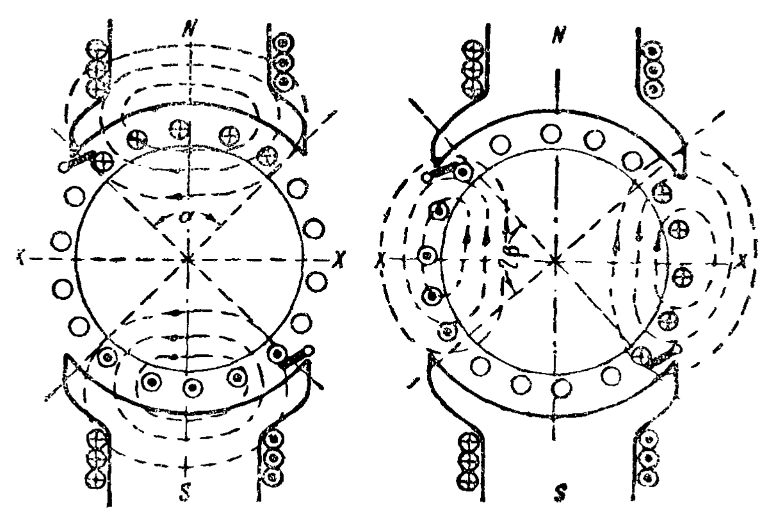



Рис. 48. Продольная и поперечная м.д.с. реакции якоря

Если обозначить дугу, охватывающую угол $\beta$, через $b_c$, то величина продольной м. д. с. определится по формуле

$$F_{пр}=2ASb_c, \qquad (73)$$

а величина поперечной м. д. с. — по формуле

$$F_{пп}=AS(\tau-2b_c). \qquad (74)$$

Чтобы выяснить, какое действие оказывает м. д. с. якоря на м. д. с. полюсов, рассмотрим кривые, характеризующие распределение индукции под полюсами (рис. 49).

На рисунке показана пара полюсов в развернутом виде. Кривая *1* характеризует распределение м. д. с. и индукции якоря под

полюсами. Линии поля якоря располагаются относительно осевых линий каждого полюса симметрично, так как средняя точка каждой параллельной ветви обмотки якоря лежит на оси полюсов. Магнитное поле пары полюсов характеризуется трапецеидальной кривой *2*.

Результирующее поле будет характеризоваться кривой *3*, образующейся в результате сложения ординат кривых *1* и *2*. Как следует из кривой, под набегающими краями полюсов поле якоря стремится размагнитить основное поле, а под сбегающими краями поля, наоборот, усиливает, намагничивает его.

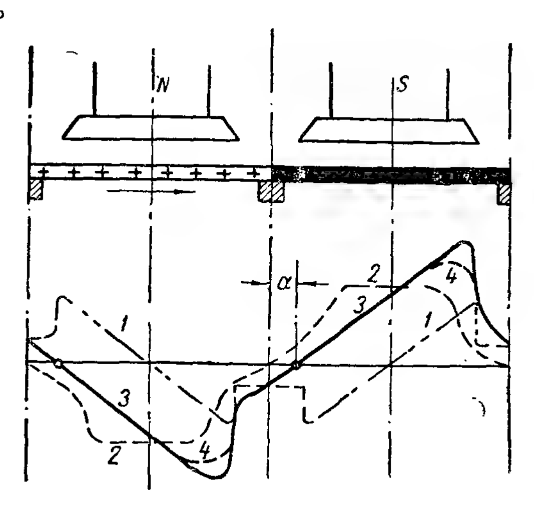



Рис. 49. Распределение индукции результирующего поля

Если сталь машины не насыщена, действие поля якоря на отдельных участках основного поля взаимоуравновешивается и результирующий поток машины практически будет по величине равен основному потоку. Однако поле искажается и его симметрия относительно оси полюсов нарушается. Физическая нейтраль смещается относительно геометрической по направлению вращения якоря на угол α, величина которого определяется величиной магнитного поля якоря.

Усиление магнитного поля под сбегающими краями полюсов может вызвать насыщение стали полюсов и зубцов на этом участке, что повлечет за собой увеличение магнитного сопротивления на данном участке.

Кривая *4* магнитной индукции в этом случае на участках с насыщенной сталью несколько сместится относительно кривой *3*, и ослабляющее действие поля якоря под набегающими краями будет больше, чем усиление его под сбегающими краями. Результирующее поле будет меньше основного, поперечная реакция якоря будет создавать размагничивающую м. д. с.

В двигателях постоянного тока реакция якоря действует в направлении, обратном ее действию в генераторах, так как ток в обмотке якоря двигателя направлен противоположно направлению действия э. д. с. В результате этого при положении щеток на геометрической нейтрали под сбегающими краями полюсов будет происходить ослабление поля, а под набегающими краями — усиление его. При сдвиге щеток с геометрической нейтрали по на-

правлению вращения якоря в двигателе будет действовать продольная намагничивающая м. д. с. якоря, а при перемещении щеток против направления вращения якоря — продольная размагничивающая м. д. с. якоря.

## § 21. КОММУТАЦИЯ ТОКА

При вращении якоря секции его обмотки последовательно переходят из одной параллельной ветви в другую. При этом в них изменяется направление тока. При переходе секции через нейтральную линию секция замыкается накоротко щеткой. Изменение направления тока в секциях якоря и связанные с ним явления называются **процессом коммутации**, или **коммутацией тока**.

Изменение тока в секциях неизбежно связано с возникновением в них э. д. с. самоиндукции, реактивной э. д. с., препятствующей всякому изменению тока, согласно закону, установленному Э. Х. Ленцом.

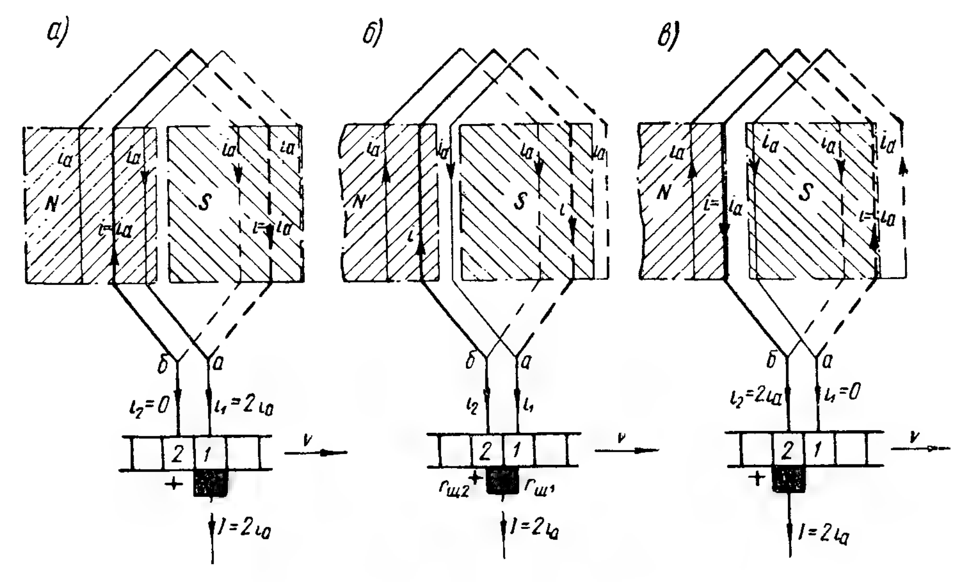



Рис. 50. Коммутация тока в секциях обмотки якоря за период коммутации $T$

Для уяснения сущности коммутации сначала рассмотрим, как протекает процесс коммутации (рис. 50), если скорость вращения якоря столь мала, что реактивная э.д.с. равна нулю

$$\left(e_L = -L\frac{di}{dt} \text{ и если } \frac{di}{dt} = 0, \text{ то } e_L = 0\right),$$

В положении, изображенном на рис. 50,*а*, коммутируемая секция находится одной стороной под южным полюсом, другой — под северным полюсом. Щетка полностью покрывает коллектор-

ную пластину *1*. При этом, если ток во внешней цепи равен $I$, то до разветвления тока в точке $a$ ток в параллельных ветвях будет равен

$$i_a = \frac{I}{2} = i. \qquad (75)$$

Примем условно показанное направление тока $i$ за положительное.

На рис. 50, *б* показано положение щетки, при котором она перекрывает обе пластины коллектора. Так как согласно сделанному выше допущению скорость вращения якоря настолько мала, что процесс коммутации может рассматриваться как безиндукционный ($e_L = 0$), то ток встречает на своем пути лишь омическое сопротивление коммутируемой секции, соединительных проводников и контакта между щеткой и коллекторной пластиной. Основным является переходное сопротивление контакта, и так как сопротивления коммутируемой секции $r_c$ и соединительных проводников $r_п$ очень малы, то ими можно пренебречь. При этом условии токи в замкнутой цепи коммутируемой секции распределяются по второму закону Кирхгофа, согласно которому алгебраическая сумма э. д. с. в замкнутой цепи равна алгебраической сумме падений напряжения на отдельных ее участках.

Такими участками в данном случае являются переходные сопротивления $r_{щ1}$ и $r_{щ2}$. Для них можно составить уравнение:

$$i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} = 0 \quad (\text{при } E = 0). \qquad (76)$$

Откуда

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_{щ2}}{r_{щ1}}.$$

Сопротивления контакта будут зависеть от площади контакта щетки с пластиной, т. е. чем больше площадь соприкосновения щетки с пластиной, тем меньше переходное сопротивление. Пропорция будет иметь следующий вид:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{S_{щ1}}{S_{щ2}}.$$

Когда край щетки приближается к пластине, он называется набегающим. При удалении края щетки от пластины он называется сбегающим. По мере уменьшения площади соприкосновения сбегающего края щетки с пластиной уменьшается и ток в коммутируемой секции. Когда площади соприкосновения щетки с пластинами *1* и *2* станут одинаковыми, ток в секции будет равен нулю ($i = 0$). По мере перехода щетки на пластину *2* площадь контакта увеличивается, ток в секции меняет свое направление на обратное и начинает возрастать с 0 до $-i_a$.

Токи в коммутируемой секции и соединительных проводниках изменяются пропорционально времени.

В третьем положении, изображенном на рис. 50,*в*, щетка переместилась с пластины *1* на пластину *2* и расположилась над ней. В этот момент ток $i$ в секции будет иметь уже обратное направление от точки *а* к точке *б*, т. е. будет отрицательным. Время в течение которого происходит процесс коммутации, называется периодом коммутации и обозначается через $T$. За один период коммутации ток $i$ в секции изменился от $+i_a$ до $-i_a$, т. е. на $2i_a$.

На рис. 51 показана графическая зависимость тока в коммутируемой секции от времени. Так как эта зависимость изображается прямой линией, то такая коммутация называется прямолинейной.

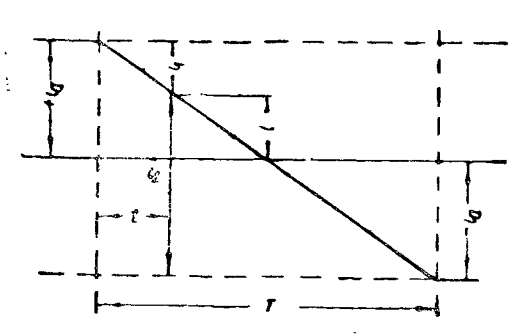


Рис. 51. Прямолинейная коммутация при $v=0$, $r_c=0$, $r_n=0$

Выше было принято, что скорость перемещения щетки ничтожно мала и э. д. с. самоиндукции в коммутируемой цепи отсутствует. На самом деле процесс коммутации происходит со значительной скоростью, и в коммутируемой секции будут наводиться э. д. с. самоиндукции $e_L$, э. д. с. взаимоиндукции $e_м$ и э. д. с. внешнего поля $e_к$.

Э. д. с. самоиндукции возникает в коммутируемой секции вследствие изменения тока в секции как по величине, так и по направлению.

Э. д. с. взаимоиндукции возникает в тех случаях, когда ширина щетки больше ширины коллекторной пластины, щетка касается одновременно нескольких пластин и процесс коммутации происходит одновременно в нескольких секциях.

Если щетки расположены на физической нейтрали, то $e_к=0$ и в коммутируемой секции будет наводиться только э. д. с. самоиндукции $e_L$, которая будет препятствовать изменениям тока в коммутируемой цепи. Она будет стремиться поддержать убывающий ток $i_1$ и уменьшить возрастающий ток $i_2$.

Э. д. с. внешнего поля $e_к$ наводится в коммутируемой секции, если она смещена относительно физической нейтрали. На рис. 50 показан процесс коммутации генератора, у которого щетки сдвинуты с геометрической нейтрали против вращения.

Если считать, что ширина щетки равна ширине коллекторной пластины и, следовательно, э. д. с. взаимоиндукции в коммутируемой секции не возникает, то общее уравнение коммутируемой цепи в соответствии со вторым законом Кирхгофа будет иметь следующий вид:

$$i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} = e_L + e_к. \qquad (77)$$

В результате алгебраического сложения обеих э.д.с. в коммутируемой цепи возникает добавочный ток коммутации $i_к$, который наложится на ток прямолинейной коммутации и вызовет его изменение. Такая коммутация будет называться криволинейной.

В результате наложения добавочного тока коммутации $i_к$ на ток прямолинейной коммутации изменение тока в коммутируемой секции будет характеризоваться кривой *2* (рис. 52).

Ток в секции будет изменяться замедленно и достигнет нулевого значения за время $t$ большее, чем $\frac{T}{2}\left(t > \frac{T}{2}\right)$. Такая коммутация называется замедленной.

Замедленная коммутация приводит к неравномерному распределению плотности тока под щетками. Под сбегающим краем щетки плотность тока будет больше, чем под набегающим. Это нарушает нормальную работу машины и вызывает искрение под щетками.

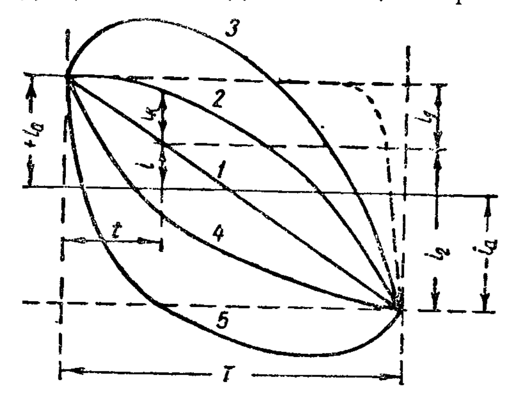



Рис. 52. Токи криволинейной коммутации

Направление действия э.д.с. $e_к$ зависит от того, в сторону какого полюса сдвинуты щетки. В одном случае направление э.д.с. внешнего поля может совпасть с направлением э.д.с. самоиндукции, усилить ее и тем еще более замедлить процесс коммутации (кривая *3*), в другом случае э.д.с. внешнего поля может быть направлена навстречу э.д.с. самоиндукции, будет ее уравновешивать и улучшит условия коммутации. При равенстве обеих э.д.с. $(e_L = e_к)$ процесс коммутации принимает прямолинейный характер.

Когда э.д.с. внешнего поля больше по величине, чем э.д.с. самоиндукции $(e_к > e_L)$, направление добавочного тока коммутации изменяется и плотность тока под сбегающим краем щетки до определенного момента будет уменьшаться, а под набегающим краем — увеличиваться. При значительном превышении э.д.с. внешнего поля над э.д.с. самоиндукции будет иметь место такое же резкое изменение тока коммутации (кривая *5*), как и при большой величине э.д.с. самоиндукции. При этом под набегающим краем щетки будет наблюдаться сильное искрение.

Из сказанного следует, что для устранения влияния реактивной э.д.с. на процесс коммутации необходимо противопоставить э.д.с. самоиндукции $e_L$ коммутируемой э.д.с. $e_к$, равную по величине и противоположно направленную ей. Это достигается созданием в зоне коммутации некоторого внешнего магнитного поля

с таким расчетом, чтобы наводимая им коммутируемая э. д. с. была равна и противоположна э.д.с. самоиндукции, т. е. чтобы

$$e_L + e_к = 0 \quad (e_L = -e_к). \tag{78}$$

Создание такого поля возможно путем некоторого смещения щеток с физической нейтрали у генераторов в сторону вращения якоря, у двигателей — в противоположную сторону. Практически угол смещения щеток определяется по степени искрения под щетками. Последние устанавливаются в положение, при котором искрение становится минимальным.

Недостаток этого способа улучшения условий коммутации тока состоит в том, что при всяком изменении нагрузки физическая нейтраль смещается в ту или иную сторону, в результате чего возникает необходимость вновь передвигать щетки.

Поэтому чаще всего дополнительное магнитное поле в современных машинах получается с помощью добавочных полюсов.

Добавочные полюсы устанавливаются между главными полюсами по линии геометрической нейтрали машины. Щетки так же располагаются на геометрической нейтрали и имеют строго фиксированное положение при всех нагрузках. Для того, чтобы наводимая дополнительными полюсами коммутируемая э.д.с. была направлена против действия реактивной э. д. с., чередование главных и дополнительных полюсов должно быть строго определенным: у генераторов N—s—S—N, у двигателей N—N—S—s.

Величина магнитной индукции *B* в дополнительном полюсе обычно составляет не более 6000—8000 *гс*. Чтобы магнитный поток полюсов возрастал пропорционально току в якоре, необходимо слабое насыщение полюсов.

Обмотка дополнительных полюсов включается последовательно и встречно с обмоткой якоря для того, чтобы создаваемый дополнительными полюсами магнитный поток был пропорционален току в якоре и компенсировал поперечный поток якоря в зоне коммутации.

На рис. 53 показано распределение м. д. с. под полюсами генератора с добавочными полюсами. Кривая *1* характеризует м.д.с. основных полюсов машины, кривая *2* — распределение м. д. с. реакции якоря, вызывающей ослабление основного поля под набегающим краем полюса и его усиление под сбегающим краем, кривая *3*—распределение м. д. с. добавочных полюсов. В результате сложения ординат трех названных кривых получается кривая *4*, которая определяет результирующую м.д.с. генератора.

Как видно из приведенных кривых, м. д. с. добавочных полюсов направлена навстречу м. д. с. реакции якоря и компенсирует ее действие в зоне коммутации. Однако вне зоны коммутации добавочные полюсы не могут уменьшить влияние реакции якоря. Следствием этого является резкая разница в величинах э. д. с., наводимых в соседних секциях обмотки якоря, и, следовательно,

между соседними коллекторными пластинами. Для нормальной работы машины разница в величинах э. д. с. между пластинами коллектора не должна быть больше 50—60 *в* у машин малой мощности, 30—35 *в* у машин средней мощности и 25—28 *в* у машин большой мощности. Если эта разница будет больше указанных

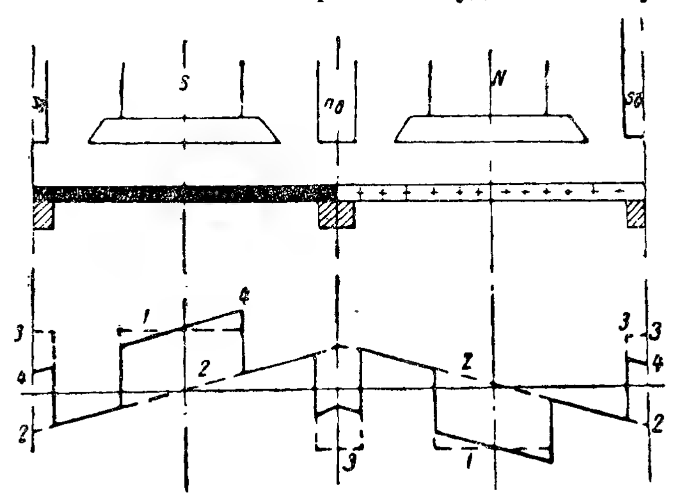



Рис. 53. Распределение м.д.с. под полюсами генератора с дополнительными полюсами

величин, то между пластинами коллектора может возникнуть электрическая дуга, которая перекроет всю поверхность коллектора. Это явление называется **круговым огнем**.

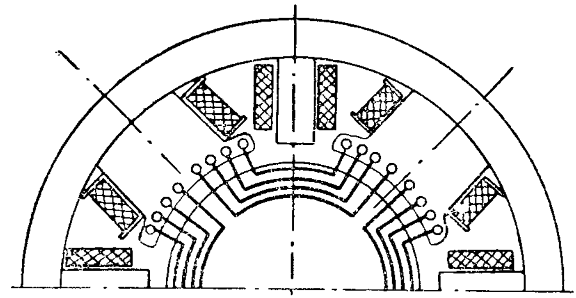


Рис. 54. Укладка компенсационной обмотки

Для предотвращения указанного явления в полюсные наконечники главных полюсов закладывается компенсационная обмотка (рис. 54) с таким расчетом, чтобы ее м. д. с. была направлена навстречу м. д. с. поперечной реакции якоря и равна ей по величине.

Однако компенсационные обмотки сильно усложняют конструкцию машины и удорожают ее. Поэтому они применяются только в крупных машинах и в машинах с тяжелыми условиями коммутации.

Оценка коммутации машины устанавливается по шкале искрения под щетками (табл. 4) по ГОСТ 183—55.

Таблица 4

| Степень искрения (класс коммутации) | Характеристика степени искрения |
|---|---|
| 1 | Отсутствие искрения (темная коммутация) |
| 1,25 | Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки |
| 1,5 | Слабое искрение под большей частью щетки |
| 2 | Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки |
| 3 | Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и вылетающих искр. Допускается в особых случаях |

Выбор сорта щеток определяется режимом работы машины, ее числом оборотов, рабочим напряжением, мощностью. Технические данные и область применения различных щеток приведены в табл. 5 по ГОСТ 183—55.

Таблица 5

| Сорт щеток | Марка | Плотность тока в $a/см^2$ | Наибольшая окружная скорость в $м/сек$ | Падение напряжения на пару щеток в $в$ | Область применения |
|---|---|---|---|---|---|
| Графитовые . . | Г | 7—11 | 12—25 | 1,7—2,2 | Тихоходные двигатели и генераторы постоянного тока большой мощности; сварочные генераторы |
| Электрографитированные . . | ЭГ | 10—12 | 25—40 | 2—3 | Машины с переменной и пиковой нагрузкой; быстроходные машины; низковольтные (до 4 $в$) генераторы |
| Твердые угольные | Т | 6 | 10 | 2 | Тяговые и крановые двигатели |
| Меднографитные | МГ | 15—20 | 20 | 0,2—1,1 | Низковольтные генераторы (24 $в$) |
| Бронзографитные | БГ | 20 | 20 | 0,3 | Низковольтные генераторы (24 $в$) |

## *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. Чему равна полная величина магнитного потока, необходимого для наведения в обмотке якоря э.д.с. заданной величины?
2. Из каких участков состоит магнитная цепь электрической машины?
3. Что такое магнитный поток рассеяния?
4. Что представляет собой коэффициент рассеяния?
5. Как математически связаны между собой полный магнитный поток машины и магнитный поток в воздушном зазоре?

6. Какая величина характеризует магнитную цепь машины?
7. Как производится расчет магнитной цепи машины?
8. Как определяется величина магнитной индукции в воздушном зазоре, в зубце якоря, в спинке якоря, в спинке станины и в сердечнике главного полюса?
9. Чему равна м.д.с. магнитной цепи машины?
10. Чему равна э.д.с. электрической машины?
11. Что характеризует кривая намагничивания машины и как она строится?
12. Каков характер кривой намагничивания и какие выводы могут быть сделаны из формы кривой?
13. Как определяется число витков обмотки возбуждения?
14. Как определить сечение обмотки возбуждения?
15. Что понимается под реакцией якоря?
16. Какое влияние оказывает реакция якоря на работу машины?
17. Что называется физической нейтралью?
18. Что называется поперечной и продольной м.д.с. реакции якоря?
19. Что характеризует линейная нагрузка якоря?
20. Какими способами устраняется вредное влияние реакции якоря?
21. В чем заключается процесс коммутации тока и какие явления при нем возникают?
22. Как устраняется влияние реактивной э.д.с. при коммутации тока?

# *Глава IV*

# РАБОТА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАТОРА

## § 22. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

Под возбуждением электрической машины постоянного тока понимают создание в ней магнитного поля, необходимого для наведения в обмотке якоря э. д. с. заданной величины.

По способу питания обмоток возбуждения машин постоянного тока различают:

1) генераторы с независимым возбуждением (рис. 55);

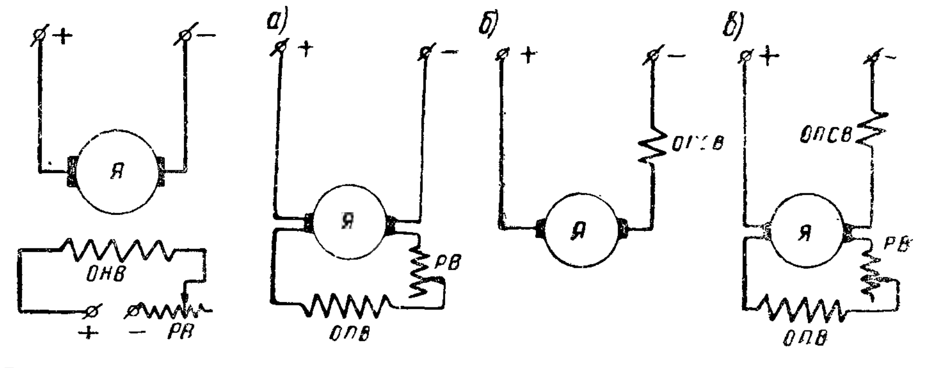



Рис. 55. Схема генератора с независимым возбуждением

Рис. 56. Генераторы с самовозбуждением

2) генераторы с самовозбуждением (рис. 56).

В зависимости от схемы включения обмоток возбуждения генераторы с самовозбуждением подразделяются на:

1) генераторы с параллельным (шунтовым) возбуждением (рис. 56,*а*);

2) генераторы с последовательным (сериесным) возбуждением (рис. 56,*б*);

3) генераторы со смешанным (компаундным) возбуждением (рис. 56,*в*).

В генераторах с независимым возбуждением (рис. 55) питание электрическим током обмотки возбуждения генератора производится от независимого, постороннего источника тока, которым могут быть аккумуляторы, небольшой генератор постоянного тока — возбудитель, независимая от основной сети — сеть постоянного тока.

Для генератора с независимым возбуждением характерна независимость его цепи возбуждения от цепи якоря, поэтому величина тока в обмотке возбуждения зависит от величины сопротивления цепи возбуждения и подводимого к ней напряжения. Мощность, потребляемая цепью возбуждения машины, составляет в процентах от номинальной мощности машины: у машин малой мощности 5—10%, у машин средней и большой мощности 1,5—4%.

У генераторов с самовозбуждением питание цепи возбуждения производится от цепи якоря машины.

Возбуждение генераторов постоянного тока с самовозбуждением основано на наличии остаточной индукции в полюсах машины $\Phi_{ост} = (2—3\%)\ \Phi_н$. При вращении якоря генератора в его обмотке за счет слабого магнитного поля остаточной индукции будет наводиться остаточная э. д. с. $E_{ост} = (2—3\%)\ E_н$. Так как цепь якоря в процессе возбуждения машины замкнута на цепь возбуждения (см. рис. 55), в цепи возникает ток $I_в$, равный:

$$I_в = \frac{E_{ост}}{r_в},$$

где:

$E_{ост}$ — остаточная э. д. с., наведенная в обмотке якоря за счет остаточной индукции, в *в*;

$r_в$ — сопротивление цепи возбуждения в *ом*.

Этот ток, проходя по обмотке возбуждения, усилит магнитный поток полюсов и вызовет соответствующее увеличение э. д. с., наведенной в обмотке якоря [1].

Увеличение э. д. с. повлечет за собой увеличение тока возбуждения, а с ним — и магнитного потока полюсов. Так, постепенно нарастая, происходит возбуждение генератора с самовозбуждением.

---

[1] Добавочный поток намагничивания должен быть направлен в ту же сторону, что и поток полюсов (согласное направление), в противном случае будет происходить размагничивание полюсов.

Процесс самовозбуждения генераторов с параллельным и смешанным возбуждением производится при холостом ходе. Этот процесс может быть изображен кривой *1* (рис. 57), характеризующей зависимость напряжения на зажимах цепи возбуждения от тока возбуждения при постоянном сопротивлении цепи возбуждения $U_в=f(I_в)$. При этом следует иметь в виду, что ток возбуждения в данном случае равен току в цепи якоря, так как обе цепи (возбуждения и якоря) представляют собой единую замкнутую цепь. При прохождении тока по цепи возбуждения в ней создается потеря напряжения $U_в=I_в r_в$, которая, будучи пропорциональна току (при $r_в=\mathrm{const}$), определится прямой *2*. Падением напряжения в цепи якоря можно пренебречь, так как сопротивление в цепи якоря очень мало.

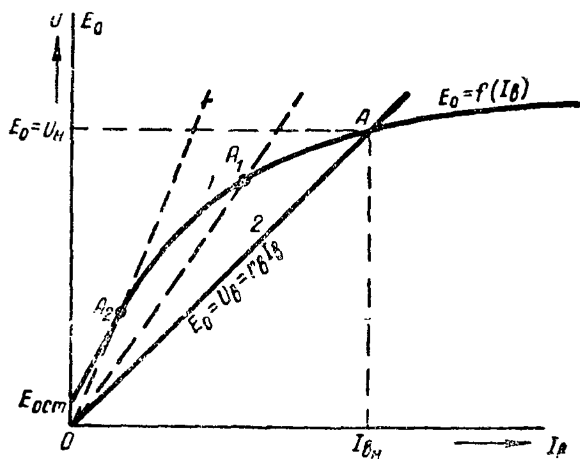



Рис. 57. Процесс самовозбуждения генераторов с параллельным и смешанным возбуждением

В точке *А* пересечения кривой *1* и прямой *2* процесс самовозбуждения прекращается, так как величина падения напряжения $U_в=I_в r_в$ в обмотке возбуждения уравняется с величиной э. д. с., наводимой в обмотке якоря, а стало быть и с величиной напряжения, действующего на зажимах обмотки возбуждения, т. е.

$$I_в r_в=U_в=E_0, \tag{79}$$

так как падением напряжения в обмотке якоря от тока возбуждения мы пренебрегаем. В цепи обмотки возбуждения установится постоянный ток возбуждения, которому при $n=\mathrm{const}$ соответствует постоянное напряжение на зажимах генератора.

Изменение скорости вращения генератора (уменьшение скорости) или величины сопротивления (увеличение сопротивления $r_в$) цепи возбуждения вызовет перемещение точки *А* по кривой *1* к ее началу. При определенных значениях $n$ или $r_в$ прямая станет касательной к кривой *1* и процесс самовозбуждения прекратится.

Напряжение на зажимах генератора, как и всякого источника тока, меньше э. д. с., наводимой в обмотке якоря, на величину падения напряжения $I_a r_a$. Оно равно

$$U = E - I_a r_a, \qquad (80)$$

где:

$U$ — напряжение на зажимах генератора в *в*;

$E$ — э. д. с. генератора в *в*,

$I_a r_a$ — падение напряжения в цепи якоря в *в*.

Заменяя в формуле напряжения э. д. с. его значением (формула 33), получаем

$$U = k_e n \Phi - I_a r_a \quad [в].$$

В процессе работы генератора число оборотов его якоря $n$ можно считать постоянным, так как оно задается первичным двигателем, приводящим во вращение генератор. Регулировку напряжения на зажимах генератора, как видно из формулы, можно производить, изменяя либо магнитный поток машины, либо сопротивление цепи якоря. Второй способ регулировки напряжения не экономичен, так как связан со значительной потерей мощности и требует громоздких реостатов, рассчитанных на полный ток нагрузки.

Обычно регулировка напряжения генераторов производится путем изменения величины тока возбуждения при помощи регулировочного реостата возбуждения (регулятора возбуждения). Последний включается в цепь возбуждения последовательно. Так как ток возбуждения незначителен, то и размеры реостата сравнительно небольшие.

## § 23. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ

Одной из основных электрических величин, определяющих работу генератора, является напряжение на его зажимах. Напряжение на зажимах генератора должно быть по возможности постоянным.

Как следует из формулы $U = k_e n \Phi - I_a r_a$, напряжение на зажимах генератора зависит от тока возбуждения $I_в$, определяющего величину магнитного потока $\Phi$, от тока нагрузки и от скорости вращения генератора. Нагляднее всего эти зависимости устанавливаются графическим путем.

Графические изображения зависимостей основных электрических величин $(U, I_в, I_a)$, определяющих работу машины, называются характеристиками.

Важнейшими характеристиками генераторов являются:

характеристика холостого хода, показывающая зависимость э. д. с. генератора от величины тока возбуждения при $I = 0$ и $n = \mathrm{const}$, т. е.

$$E_0 = f(I_в) \text{ или } U_0 = f(I_в);$$

**внешняя характеристика**, показывающая зависимость напряжения на зажимах генератора от тока в якоре при $n$=const и $I_в$=const, т. е.

$$U=f(I_a);$$

**регулировочная характеристика**, показывающая зависимость величины тока возбуждения от тока в якоре при $n$=const и $U$=const, т. е.

$$I_в=f(I_a).$$

Характеристики даются либо непосредственно в единицах измерения, либо, что чаще, в относительных единицах, в процентах от номинальных величин.

## § 24. ГЕНЕРАТОР С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Прежде чем к генератору подключить внешнюю цепь, его обычно возбуждают, т. е. создают в нем магнитное поле, при котором в обмотке якоря наводится э. д. с. номинальной величины. Процесс возбуждения генератора определяется характеристикой холостого хода. Скорость вращения якоря генератора устанавливается постоянной ($n$=const), что обеспечивается поддержанием постоянства скорости первичного двигателя. Если $I$=0, то из уравнения $E_0=k_e n \Phi_0$ следует, что э. д. с. пропорциональна магнитному потоку. Поэтому зависимость между э. д. с. и током возбуждения представляет собой зависимость между магнитным потоком и м. д. с. обмотки возбуждения $\Phi_0=f(F)$, т. е. она аналогична кривой намагничивания машины.

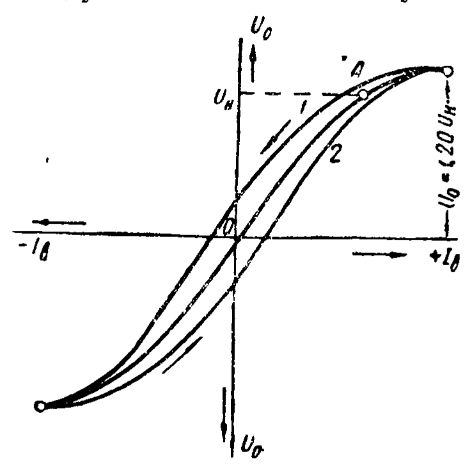



Рис. 58. Характеристика холостого хода

На рис. 58 приведена характеристика холостого хода генератора. Так как при разомкнутой внешней цепи ($I_a$=0) напряжение в обмотке якоря не падает ($I_a r_a$=0), а $k_e$=const и $n$=const, то $E_0=U_0 \equiv \Phi_0$.

Характеристику холостого хода снимают следующим образом. Вольтметр генератора подбирают по номинальному напряжению, амперметр в цепи возбуждения — по наибольшему току возбуждения. Щетки должны быть установлены на линии геометрической нейтрали. Генератору задается номинальная скорость вращения, которая измеряется тахометром.

После того, как генератор разовьет номинальное число оборотов, включают цепь питания обмотки возбуждения и постепенно

выводят реостат возбуждения до тех пор, пока э. д. с. на зажимах генератора не достигнет величины 1,15—1,20 $U_н$.

При этом производят первое измерение напряжения $U$ и тока возбуждения $I_в$. Затем, вводя реостат возбуждения, делают шесть-восемь промежуточных измерений. Последний отсчет производится при положении рукоятки реостата на холостом контакте, т. е. при разомкнутой цепи возбуждения. При этом измеряется величина э. д. с. в обмотке якоря, наводимая за счет остаточной индукции. Величина э. д. с. обычно составляет (2—5%) $U_н$.

После этого направление тока в цепи возбуждения меняют на обратное и, постепенно уменьшая сопротивление реостата возбуждения, делают ряд новых отсчетов величин тока возбуждения и напряжения холостого хода, но уже в обратном порядке. Последний отсчет выполняют при напряжении, равном 1,15—1,20$U_н$.

По полученным данным строят кривую, которая и будет характеристикой холостого хода. Если нисходящую ветвь повернуть относительно точки 0 на 180°, получим восходящую ветвь. Практически за характеристику холостого хода принимают кривую, лежащую посередине между обеими ветвями.

Чаще характеристику холостого хода строят не в абсолютных, а в относительных единицах, переводя абсолютные величины в относительные. При этом за единицу напряжения принимают номинальное напряжение $U_н$ и соответствующий ему ток возбуждения $I_{в_0}$ при холостом ходе. Промежуточные значения пересчитывают, пользуясь отношениями

$$U_{отн} = \frac{U}{U_н}; \qquad i_{в_{отн}} = \frac{I_в}{I_{в_0}}.$$

Характеристика холостого хода позволяет определить степень магнитного насыщения стали полюсов и ярма. То, что кривые *1* и *2* не проходят через нулевую точку, свидетельствует о наличии остаточной индукции.

Нисходящие и восходящие ветви характеристики образуют петлю гистерезиса, характеризующую намагничивание стали машины. Как видно, точка на кривой, соответствующая номинальной э. д. с. на зажимах машины, лежит на колене кривой. Смещение этой точки на прямолинейный участок кривой вызвало бы неустойчивость напряжения на зажимах генератора при его работе, а смещение точки за колено кривой ограничило бы регулирование напряжения.

Наряду с характеристикой холостого хода часто снимается нагрузочная характеристика машины, которая показывает зависимость $U=f(I_в)$ при $I_a=\text{const}$ и $n=\text{const}$. Эта характеристика снимается при некоторой постоянной нагрузке и позволяет установить размагничивающее действие реакции якоря.

Для снятия характеристики генератору задают номинальную скорость, а затем, постепенно выводя реостат возбуждения, повышают значение э. д. с. на его зажимах до величины, равной (1,10—1,15%) $U_н$. После этого к генератору подключают внешнюю

цепь и задают ему номинальную нагрузку, с тем чтобы по цепи якоря проходил номинальный ток $I_a$. При установившемся номинальном токе и напряжении на зажимах генератора записывают величину тока возбуждения. Затем постепенно уменьшают ток возбуждения, увеличивая сопротивление реостата возбуждения, и выполняют пять-шесть промежуточных отсчетов величин тока возбуждения и напряжения. При этом посредством нагрузочного реостата, который постепенно выводят из цепи, величину тока в цепи якоря поддерживают постоянной.

В качестве нагрузочного реостата лучше всего использовать жидкостный реостат, позволяющий наиболее плавно регулировать

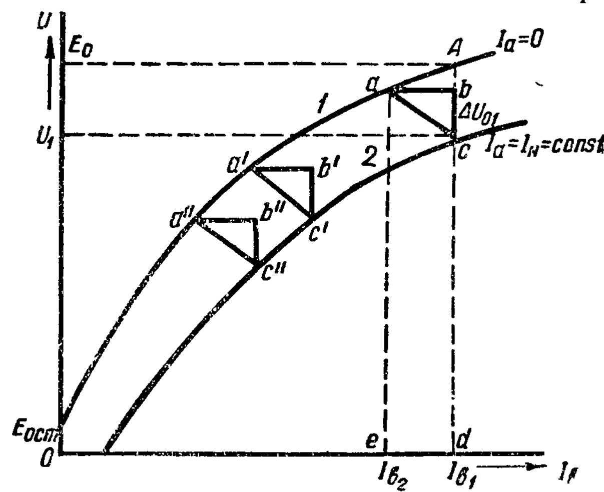



Рис. 59. Характеристики генератора с независимым возбуждением:

1—холостого хода; 2—нагрузочная

величину тока. После пересчета полученных показаний в относительные единицы строят кривую 2 (рис. 59), это и будет нагрузочная кривая. На этом же рисунке показана характеристика холостого хода ($I_a = 0$). При работе генератора под нагрузкой напряжение на его зажимах всегда будет меньше э. д. с. за счет падения напряжения в цепи якоря $I_a r_a$. Э. д. с. на зажимах генератора при холостом ходе $E_0 = U_0$ при токе возбуждения $I_{в1}$ определяемом отрезком *Od*, показана на характеристике холостого хода точкой *A*. Возникающие при нагрузке продольная и поперечная м. д. с. якоря создадут добавочную размагничивающую м. д. с., величина которой в масштабе тока возбуждения определяется отрезком *de*. Результирующая м. д. с. генератора в этом случае будет равна отрезку *Oe*. Соответственно этой м.д.с. электродвижущая сила на зажимах генератора на характеристике холостого хода будет определяться точкой *a*. Если из точки *a* провести прямую, параллельную оси абсцисс, до ее пересечения с вертикальной прямой *Ad*, то отрезок *cb* будет характеризовать падение напряже-

ния $\Delta U_a = I_a r_a$, а точка $c$ — величину напряжения на зажимах генератора $U = E - I_a r_a$ при токе нагрузки $I_a$ и токе возбуждения $I_{в_1}$. Отрезок прямой $Ac$ определяет полное падение напряжения на зажимах генератора, являющееся следствием реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря с ростом нагрузки. Если точки $a$ на характеристике холостого хода и $c$ на нагрузочной характеристике соединить прямой $ac$, то получится прямоугольный треугольник $abc$ со стороной $ab$ ($ab = de$), определяющей действие реакции якоря, и стороной $bc$, определяющей величину падения напряжения в обмотке якоря. Этот треугольник называется характеристическим.

Этот треугольник используется для построения характеристик генераторов. Характеристический треугольник всегда может быть построен, исходя из опытной нагрузочной характеристики генератора. Для этого, задавшись определенной величиной тока возбуждения $I_{в_1}$ восстанавливают из точки $d$ перпендикуляр до его пересечения с нагрузочной характеристикой в точке $c$. От этой точки вверх откладывают отрезок $cb$, равный величине падения напряжения в цепи якоря [$\Delta U_a = I_a(r_a + r_щ)$, где $r_щ$ — сопротивление щеточного контакта]. Проведя из точки $b$ прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения ее с характеристикой холостого хода *1* в точке $a$ и соединив точки $a$ и $c$ прямой, получим искомый характеристический треугольник.

Такие треугольники строятся для различных токов возбуждения. При постоянной нагрузке падение напряжения $I_a r_a$ практически остается постоянным $\Delta U_a = I_a r_a = \text{const}$, однако размагничивающее действие поперечной реакции якоря изменяется. Оно увеличивается по мере роста насыщения машины.

Для лучшего выяснения действия реакции якоря при различных насыщениях и строят ряд треугольников $a'b'c'$, $a''b''c''$ и т. д.

Зависимость напряжения на зажимах генератора от тока якоря при постоянной скорости вращения и токе возбуждения определяется внешней характеристикой ($U = f(I_a)$ при $n = \text{const}$; $I_в = \text{const}$).

У генератора с независимым возбуждением э.д.с. ($E = k_e n \Phi$) с увеличением нагрузки, но при постоянной скорости, изменяется только под влиянием реакции якоря, оказывающей размагничивающее действие. С увеличением нагрузки и возрастанием действия реакции якоря э. д. с. уменьшается. Приближенно считаем, что размагничивающее действие поперечной реакции якоря изменяется пропорционально току в якоре. Тогда величина уменьшения э. д. с. $\Delta E$ будет пропорциональна току нагрузки. Действительно, катеты характеристического треугольника при сделанном допущении будут пропорциональны току нагрузки $I_a$.

Внешняя характеристика (рис. 60), показывающая зависимость $U = f(I_a)$, располагается ниже характеристики (внутренней), отображающей зависимость $E = f(I_a)$, так как для генератора $U = E - I_a r_a$. Общее падение напряжения $\Delta U$ за-

висит не только от реакции якоря, но и от величины падения напряжения в цепи якоря.

Если величину падения напряжения $I_a r_a$ показать соответствующей прямой, отвечающей росту тока, то ординаты этой прямой будут равны разности между ординатами характеристик $E=f(I_a)$ и $U=f(I_a)$, $ad-cd=bd$.

Для снятия внешней характеристики генератору сообщают постоянное номинальное число оборотов, возбуждают его, нагружают и устанавливают на его зажимах при номинальной нагрузке номинальное напряжение. Показания приборов дадут первую точку для построения внешней характеристики. Затем генератор постепенно разгружают до холостого хода и делают при этом пять-шесть замеров для получения промежуточных точек характеристики. Полученные данные замеров пересчитывают в относительные единицы, принимая за единицу номинальные значения $I_н$ и $U_н$.

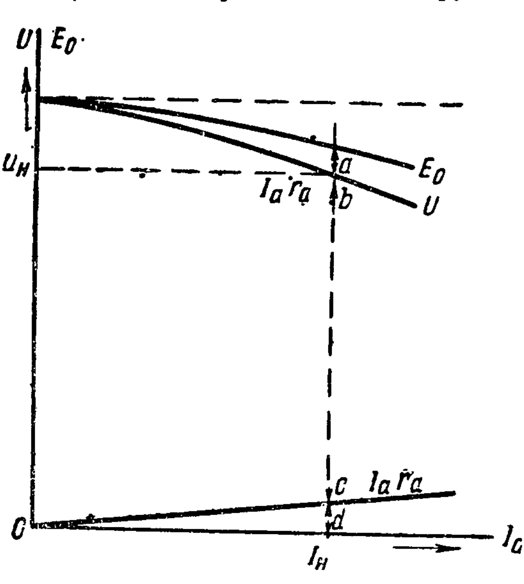


Рис. 60. Внешняя и внутренняя характеристики генератора с независимым возбуждением

$$U_{отн}=\frac{U}{U_н}\,; \qquad I_{отн}=\frac{I}{I_н}\,.$$

По внешней характеристике определяется изменение напряжения при уменьшении тока нагрузки от номинального до нуля (при $n=\text{const}$, $i_в=\text{const}$) в процентах к номинальному напряжению по формуле:

$$\Delta U\% = \frac{U_0-U_н}{U_н}100 = (U_{0_{отн}} - U_{отн})100. \qquad (81)$$

У генераторов с независимым возбуждением с изменением нагрузки от холостого хода до номинальной напряжение изменяется в пределах: у генераторов с дополнительными полюсами 5—8%, у генераторов без дополнительных полюсов 7 — 12%.

Как следует из внешней характеристики, для поддержания напряжения на зажимах генератора постоянным при помощи реостата возбуждения уменьшают или увеличивают ток возбуждения. При увеличении нагрузки от нуля до номинальной ток возбуждения $I_в$ увеличивают, вследствие чего повышаются э. д. с. и напряжение на зажимах генератора. Зависимость между током нагрузки и током возбуждения $I_в=f(I_a)$ при $U=\text{const}$ и $n=\text{const}$

называется **регулировочной характеристикой** (рис. 61).

Для снятия регулировочной характеристики генератор возбуждают до номинального напряжения при холостом ходе. По показаниям приборов определяется первая точка замера для построения характеристики. Затем постепенно вводят нагрузку, поддерживая все время напряжение неизменным, для чего соответственно увеличивают ток возбуждения. В процессе увеличения нагрузки от нуля до номинальной выполняют пять-шесть промежуточных замеров. По данным замеров строят кривую.

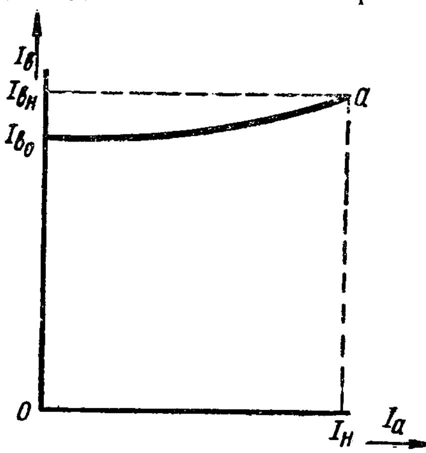



Рис. 61. Регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением

Регулировочная характеристика позволяет рассчитать регулировочный реостат в цепи возбуждения. Кроме того, она используется при расчете к. п. д генератора.

## § 25. ГЕНЕРАТОР С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Обмотка возбуждения генератора с параллельным возбуждением получает питание электрическим током от цепи якоря (рис. 56, *а*). Таким образом, общий ток равен $I=I_a+I_в$. Возбуждение генератора основано на явлении остаточной индукции в полюсах машины. Возбуждение возможно лишь при отключенной внешней цепи, так как в противном случае э. д. с., наводимая в якоре за счет остаточного магнетизма, будет расходоваться во внешней цепи. Напряжение на зажимах генератора определяется по формуле

$$U=E-I_a r_a.$$

Характеристика холостого хода и нагрузочная характеристика (рис. 62) генератора с параллельным возбуждением подобны характеристике холостого хода и нагрузочной характеристике генератора с независимым возбуждением. Снятие их производится в том же порядке, как и характеристик генератора с независимым возбуждением.

Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением значительно отличается от внешней характеристики генератора с независимым возбуждением.

Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением (рис. 63) показывает зависимость $U=f(I_a)$ при $n=\text{const}$ и $r_в=\text{const}$.

Однако, если у генератора с независимым возбуждением ток возбуждения $I_в$ благодаря постоянству сопротивления цепи возбуждения оставался неизменным, то у генератора с параллельным возбуждением он меняется с изменением нагрузки.

При увеличении нагрузки напряжение на зажимах генератора под влиянием реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря

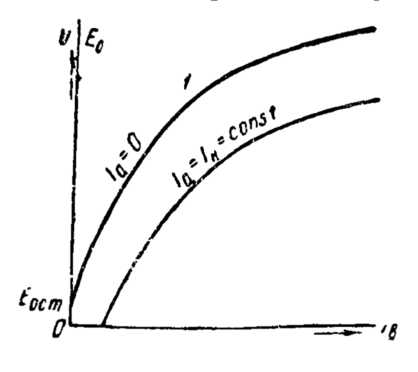



Рис. 62. Характеристики генератора с параллельным возбуждением: 1—холостого хода; 2—нагрузочная

Рис. 63. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением

падает. Уменьшение напряжения $U$ вызывает уменьшение тока возбуждения, который равен

$$I_в = \frac{U}{r_в + r_р} \quad [a], \qquad (82)$$

где:

$U$ — напряжение на зажимах генератора в *в*;

$r_в$ — сопротивление обмотки возбуждения в *ом*;

$r_р$ — сопротивление реостата возбуждения в *ом*.

В свою очередь уменьшение $I_в$ вызывает уменьшение основного магнитного потока, а следовательно, и э. д. с. $E$ на зажимах генератора и напряжения $U$. С уменьшением напряжения происходит дальнейшее уменьшение тока возбуждения и т. д.

Таким образом, при увеличении нагрузки генератора происходит его размагничивание.

В генераторе с параллельным возбуждением ток нагрузки увеличивается лишь до определенного критического значения $I_{кр}$.

Это критическое значение тока обычно превышает номинальное не более чем в 2—2,5 раза.

Величина тока зависит от двух факторов: величины напряжения на его зажимах и сопротивления внешней цепи. При уменьшении сопротивления сети, т. е. при увеличении нагрузки, будет уменьшаться и напряжение на зажимах генератора. Вначале магнитная цепь генератора насыщена, размагничивание идет медленно и напряжение изменяется незначительно. Преобладающей бу-

дет величина сопротивления внешней цепи, вследствие чего ток в цепи якоря увеличивается.

Однако при дальнейшем увеличении тока степень насыщения стали резко уменьшается и напряжение начнет быстро падать. Преобладающим будет уже не уменьшение сопротивления цепи, а падение напряжения. Ток, достигнув критического значения, начнет уменьшаться. При коротком замыкании ток возбуждения будет равен нулю, так как $U=0$ и $I_в=\frac{U}{r_в}=0$. Величина тока короткого замыкания $I_{ак.з}$ будет определяться только величиной остаточной индукции, т. е. $I_{ак.з}=\frac{E_{ост}}{r_a}$.

При быстром возникновении режима короткого замыкания магнитный поток не успевает измениться и наводимая им в обмотке якоря э.д.с. может оказаться по величине близкой к номинальному ее значению. Так как при коротком замыкании генератор оказывается замкнутым на весьма малое сопротивление, то ток короткого замыкания может достигнуть значительной величины, в результате чего на коллекторе может возникнуть круговой огонь даже при незначительном возбуждении.

Относительное изменение напряжения у генераторов с параллельным возбуждением, снабженных добавочными полюсами, колеблется в пределах 8—15%, а без дополнительных полюсов —в пределах 12—20%.

Регулировочная характеристика генератора с параллельным возбуждением имеет такой же вид, как и у генератора с независимым возбуждением. Однако эта характеристика имеет более крутую форму, так как вследствие большего процентного изменения напряжения при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной для поддержания напряжения постоянным требуется регулировка тока возбуждения в более широких пределах.

Внешняя и регулировочные характеристики генератора могут быть построены графическим путем по характеристическому треугольнику и характеристике холостого хода. Для этого сначала в относительных единицах строят характеристику холостого хода (рис. 64). Из точки $N$ на оси ординат, соответствующей номинальному напряжению, проводят линию, параллельную оси абсцисс, и строят характеристический треугольник таким образом, чтобы он вершиной $c'$ опирался на линию $NC$, а вершиной $a$ касался характеристики холостого хода. Прямая, проведенная через точки $O$ и $c'$ и продолженная до пересечения с кривой холостого хода, будет характеризовать зависимость величины падения напряжения в цепи возбуждения от величины тока возбуждения $[U_в=I_в r_в=f(I_в)]$.

Внешняя характеристика снимается при $r_в=\text{const}$ и $I_в$ изменяется только за счет изменения $U_в$ на щетках генератора. Для этого случая зависимость $U_в=f(I_в)$ будет выражаться прямой линией, проходящей через точку $O$. Эта линия называется ха-

рактеристикой цепи возбуждения или линией постоянного сопротивления цепи возбуждения. Нетрудно видеть, что $\operatorname{tg}\alpha$ пропорционален $r_в$.

Влево от оси ординат откладываем отрезок, соответствующий номинальному току нагрузки $I_н$, и восстанавливаем из конца этого отрезка (точка $d$) перпендикуляр до пересечения его с линией $NC$. Отрезок $dc'$ будет равен $ON=U_н$. Точка $c'$ является первой точкой внешней характеристики.

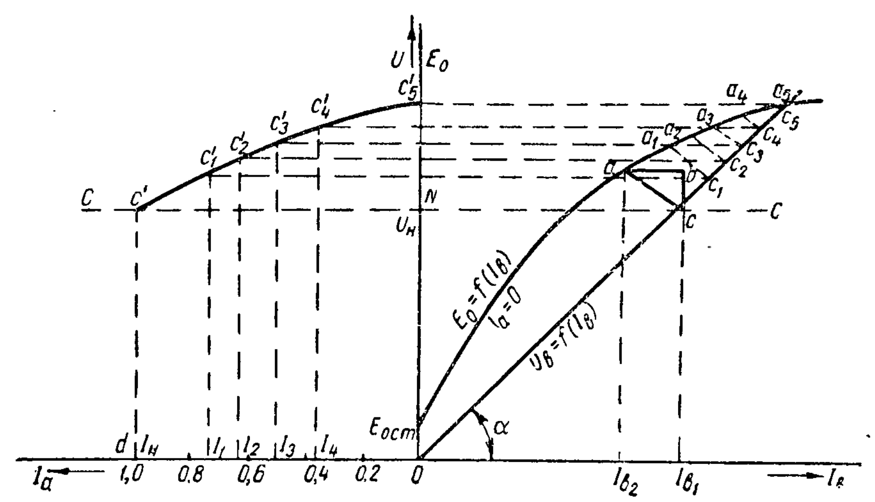



Рис. 64. Построение внешней характеристики по характеристическому треугольнику и характеристике холостого хода

Для нахождения других точек, через которые должна проходить внешняя характеристика, проводят ряд линий, параллельных гипотенузе $ac$ характеристического треугольника. Через точки их пересечения с характеристикой холостого хода $a_1$, $a_2$, $a_3$, $a_4$, $a_5$ проводят линии, параллельные линии $NC$. После чего определяют соответствующие токи из отношений:

$$I_1=I_н\frac{a_1c_1}{ac}; \quad I_2=I_н\frac{a_2c_2}{ac}; \quad I_3=I_н\frac{a_3c_3}{ac} \text{ и т. д.}$$

Отложив полученные значения токов на линии абсцисс влево от линии ординат и восстановив из точек $I_1$, $I_2$, $I_3$, $I_4$ перпендикуляры до их пересечения соответственно с параллельными линиями $c_1c_1'$, $c_2c_2'$, $c_3c_3'$, $c_4c_4'$, получаем искомые промежуточные точки кривой.

Соединив точки $c_1'$, $c_2'$, $c_3'$, $c_4'$ и $c_5'$ сплошной линией, получаем внешнюю характеристику машины. Процентное изменение напряжения с изменением нагрузки определяется из отношения:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_н}100 = \frac{Oc'_5 - ON}{ON}100.$$

Изменение напряжения генератора соответствует изменению нагрузки от нуля до номинальной величины.

Построение регулировочной характеристики по характеристике холостого хода и характеристическому треугольнику подобно вышеописанному построению (рис. 65).

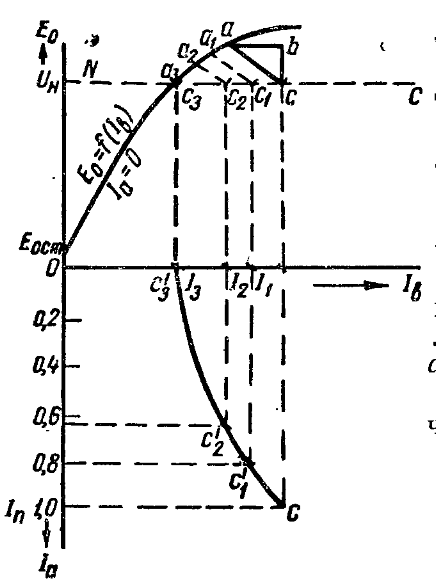



Рис. 65. Построение регулировочной характеристики по характеристическому треугольнику и характеристике холостого хода

В системе прямоугольных координат строят характеристику холостого хода. Через точку $N$, соответствующую величине номинального напряжения $U_н$, проводят линию $NC$, параллельную оси абсцисс.

Строят характеристический треугольник так, чтобы его вершина $c$ лежала на линии $NC$, а вершина $a$ — на характеристике холостого хода. Проводят ряд линий $a_1c_1$, $a_2c_2$, $a_3c_3$, параллельных $ac$, до пересечения с линией $NC$ и из точек $c_1$, $c_2$, $c_3$ опускают перпендикуляры на линию абсцисс, продолжая линии перпендикуляров в четвертую четверть. На линии ординат вниз от линии абсцисс откладывают в относительных единицах ток нагрузки. Из точки, соответствующей номинальной нагрузке $I_н = 1$, проводят линию, параллельную оси абсцисс, до ее пересечения в точке $c'$ с перпендикуляром, опущенным из вершины $c$ характеристического треугольника.

Промежуточные значения токов нагрузки определяют по отношениям:

$$I_1 = I_н \frac{a_1c_1}{ac}\ ;\quad I_2 = I_н \frac{a_2c_2}{ac}\ ;\quad I_3 = \frac{a_3c_3}{ac}.$$

Отложив полученные значения токов $I_1$, $I_2$, $I_3$ на оси ординат $I_a$ проводят через них линии, параллельные оси абсцисс, до пересечения с соответствующими перпендикулярами, восстановленными из точек $c_1$, $c_2$ и $c_3$. Точки пересечения $c_1'$, $c_2'$ и $c_3'$ являются промежуточными точками кривой. Соединяя точки между собой, получают искомую регулировочную характеристику.

## § 26. ГЕНЕРАТОР С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Обмотка возбуждения генератора с последовательным возбуждением включена последовательно с обмоткой якоря, поэтому через нее проходит весь ток нагрузки.

Напряжение на зажимах этого генератора определяется по формуле

$$U=E-I_a(r_a+r_в),$$

где $r_a$ и $r_в$ соответственно сопротивления обмоток якоря и возбуждения.

Характеристика холостого хода и нагрузочная характеристика для генератора с последовательным возбуждением могут быть сняты лишь при условии питания обмотки возбуждения генератора от постороннего источника тока. Таким образом, эти характеристики для генератора с последовательным возбуждением аналогичны соответствующим характеристикам для генератора с независимым возбуждением.

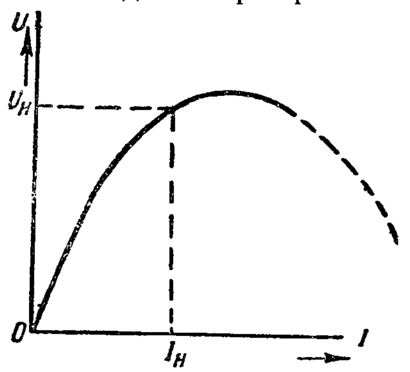


Рис. 66. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением

Внешняя характеристика (рис. 66) генератора показывает, что с увеличением тока нагрузки от нуля до его номинального значения напряжение на зажимах генератора вначале быстро растет почти прямопропорционально току нагрузки, так как магнитная цепь генератора еще не насыщена. Затем его рост постепенно уменьшается и, наконец, прекращается. Объясняется это тем, что ток якоря одновременно является и током возбуждения, и с ростом нагрузки происходит насыщение стали и напряжение растет значительно медленнее. Однако одновременно с ростом тока увеличивается влияние реакции якоря, а также падение напряжения $U=I_a(r_a+ +r_в)$, вызывающее уменьшение напряжения на зажимах генератора.

При большом насыщении стали магнитной цепи машины рост магнитного потока и э.д.с. почти прекратится. В то же время внутреннее падение напряжения и реакция якоря будут продолжать возрастать. При коротком замыкании напряжение на зажимах генератора будет равно нулю, а ток короткого замыкания будет намного превышать номинальный ток машины.

Вследствие резкого колебания напряжения на зажимах генератора при изменениях нагрузки генераторы с последовательным возбуждением почти не применяются для практических целей.

## § 27. ГЕНЕРАТОР СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Генератор со смешанным возбуждением имеет на каждом полюсе две обмотки: параллельную, включенную параллельно обмотке якоря, и последовательную, включенную последовательно с обмоткой якоря.

Часто обе обмотки соединяют так, чтобы их м. д. с. складывались. Применяются также машины со встречным включением обмоток. Свойства генератора со смешанным возбуждением зависят от соотношения м. д. с. обеих обмоток.

Если желательно получить генератор, у которого напряжение на щетках в определенных пределах постоянно и не зависит от нагрузки, то основной будет обмотка параллельного возбуждения. Ее м. д. с. значительно больше м. д. с. последовательной обмотки. Последняя подбирается так, чтобы ее м. д. с. компенсировала продольную реакцию якоря и размагничивающее действие поперечной реакции якоря.

Если магнитная система машины сильно насыщена, то последовательная обмотка будет слабо воздействовать на поток генератора и не сможет стабилизировать напряжение на зажимах генератора, так как м. д. с. ее не будет пропорциональна создаваемому потоку.

Для получения такой пропорциональности генераторы со смешанным возбуждением проектируют с относительно слабым насыщением магнитной системы.

Так как в процессе возбуждения генератора ток в обмотке последовательного возбуждения равен нулю, характеристика холостого хода генератора подобна соответствующей характеристике генератора с параллельным возбуждением. Внешние характеристики [рис. 67 (кривая 2)] вследствие действия витков обмотки последовательного возбуждения могут располагаться выше характеристики холостого хода, в остальном они почти ничем не отличаются от таких же характеристик для генератора с параллельным возбуждением.

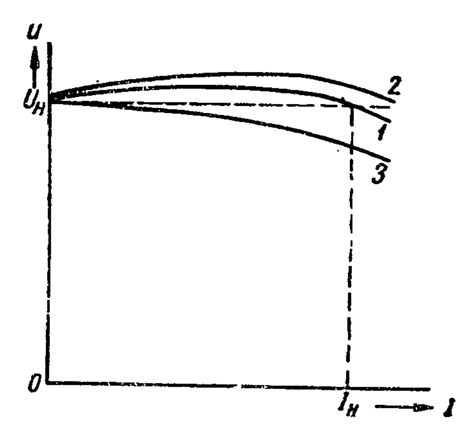


Рис. 67. Внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждеиием

Из внешней характеристики генератора со смешанным возбуждением видно, что при соответствующем подборе витков обмотки последовательного возбуждения ее м. д. с. может уравновесить падение напряжения генератора от действия реакции якоря, и напряжение на зажимах генератора при изменении нагрузки от нуля до номинальной остается почти постоянным («нормальная обмотка последовательного возбуждения»). Для того чтобы восполнить потери напряжения во внешней цепи, обмотку последовательного возбуждения иногда выполняют с несколько большим чис-

лом витков. В этом случае напряжение на зажимах генератора при холостом ходе будет выше номинального («усиленная обмотка последовательного возбуждения»).

Регулировочные характеристики генератора со смешанным возбуждением при согласном включении обмоток параллельного и последовательного возбуждения подобны внешним характеристикам, повернутым вокруг своей оси на 180°.

Генераторы с параллельным и смешанным возбуждением имеют широкое практическое применение. Генераторы со смешанным возбуждением применяются во всех случаях, когда необходимо обеспечить постоянство напряжения при часто меняющихся нагрузках.

## § 28. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На электрических станциях обычно устанавливается несколько генераторов. Суммарная мощность их должна соответствовать мощности питаемых ими потребителей.

Кроме того, на случай аварии одного из работающих генераторов или остановки его на профилактический ремонт должен быть резервный генератор, мощность которого позволяет заменить им любой выбывший из строя рабочий генератор. Установка нескольких генераторов имеет ряд преимуществ, в том числе:

1) при одном генераторе его мощность должна быть рассчитана на максимальную (пиковую) нагрузку; при спадении нагрузки коэффициент использования генератора может быть незначительным; при нескольких генераторах всегда имеется возможность отключить часть генераторов с тем, чтобы остальные работали с полной загрузкой;

2) общая мощность резервных генераторов значительно меньше, чем при выборочной работе генераторов;

3) при однотипных генераторах имеется возможность сократить количество сменных и запасных деталей и т. д.

При установке на электрической станции нескольких генераторов они включаются на шины станции параллельно.

Для параллельной работы генераторов необходимо, чтобы была соблюдена полярность генераторов, т. е. к отрицательной шине были подключены отрицательные полюсы генераторов, к положительной — положительные; чтобы напряжения на зажимах всех генераторов были одинаковы; чтобы каждый генератор отдавал в сеть ток, соответствующий его мощности.

Ввод генератора в параллельную работу с уже работающим генератором требует соблюдения двух непременных условий: во-первых, э.д.с. вводимого генератора должна быть равна напряжению на шинах станции; во-вторых, полярность вводимого генератора должна соответствовать полярности шин, к которым присоединяется данный генератор.

На рис. 68 приведена схема параллельной работы двух генераторов с параллельным возбуждением, из которых—генератор *1* работает, генератор *2* вводится в работу. Порядок ввода генератора *2* в параллельную работу следующий:

1) первичному двигателю генератора *2* сообщают номинальную скорость;

2) э.д.с. на зажимах вводимого генератора при помощи реостата возбуждения уравнивают с напряжением на шинах ($E_0=U$)

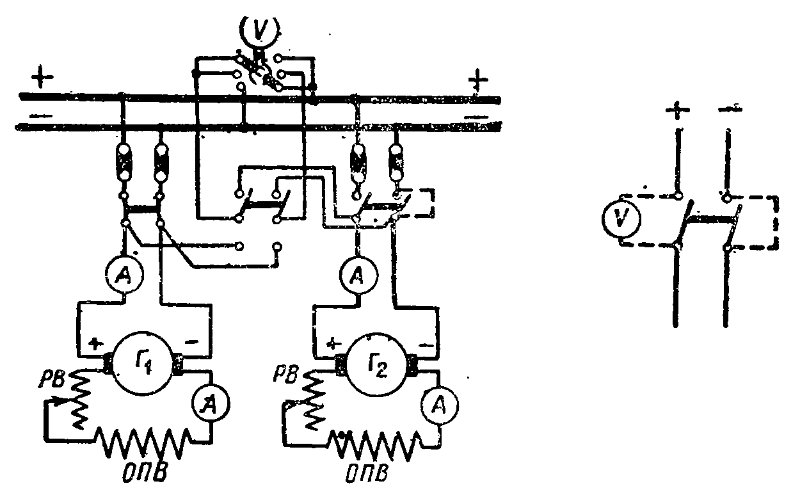



Рис. 68. Схема параллельной работы генераторов с параллельным возбуждением

3) генератор *2* подключают к шинам станции;

4) нагружают генератор, распределяя нагрузку между генераторами пропорционально их мощности.

В тех случаях, когда генератор включают в параллельную работу после длительной остановки или профилактического ремонта, следует проверить правильность его подключения. Для этого можно воспользоваться магнитоэлектрическим вольтметром или контрольной лампочкой. Вольтметр подключают (см. рис. 68) к зажимам одного из полюсов разомкнутого рубильника, второй полюс рубильника замыкается перемычкой.

При правильном присоединении генераторов и равенстве их напряжений стрелка вольтметра установится на нуле, так как сумма э.д.с., действующих в замкнутом контуре обоих генераторов, будет равна нулю.

При неправильном включении генераторов показание вольтметра будет равно сумме напряжений генераторов.

Поэтому для проверки полярности следует пользоваться вольтметром, рассчитанным на двойное напряжение. Таким же образом включается контрольная лампочка, которая также должна

быть рассчитана на двойное напряжение. Если вольтметр или лампочка не рассчитаны на двойное напряжение, то включение их производится по такой же схеме, но генератор не должен быть возбужден.

Ток возбуждения проверяемого генератора увеличивают постепенно от нуля до небольшой величины. При правильном включении напряжение, показываемое вольтметром, начнет уменьшаться так же, как и сила света контрольной лампы. При неправильном включении явление будет обратным.

Так как при включении генератора на параллельную работу его э.д.с. равна напряжению на шинах станции ($U = -E_{2_0}$), то ток вводимого генератора равен нулю.

$$I = \frac{E_{2_0} - U}{r_a} = 0.$$

Чтобы нагрузить генератор, надо увеличить его э.д.с., для чего необходимо увеличить ток в его обмотке возбуждения, уменьшив сопротивление реостата возбуждения. С увеличением тока возбуждения возрастет его э.д.с., ток и развиваемая им мощность. Число оборотов должно поддерживаться постоянным.

После включения вводимого генератора следует снять часть нагрузки с работающего генератора. Для этого уменьшают ток возбуждения последнего.

При уменьшении тока возбуждения генератора необходимо следить за тем, чтобы он не перешел на работу в двигательном режиме. Это может произойти в том случае, если величина э.д. с. генератора станет меньше напряжения на шинах ($E_{1_0} < U$). При этом ток изменит свое направление и машина начнет потреблять ток из сети.

При выводе генератора из параллельной работы его нужно предварительно разгрузить, т. е., уменьшая ток возбуждения, уравнять его э.д.с. с напряжением на шинах. Тогда ток в якоре станет равен нулю ($I_a = 0$) и генератор можно отключить.

Параллельная работа генераторов с параллельным возбуждением не всегда достаточно устойчива. Если по какой-либо причине увеличится число оборотов одного из генераторов, то его э.д.с. возрастет и он примет на себя дополнительную нагрузку, в то время как другой генератор сбросит с себя часть нагрузки. Важнейшее условие параллельной работы генераторов нарушится, так как мощности, отдаваемые генераторами в сеть, не будут пропорциональны их номинальным мощностям.

Этим недостатком не обладают генераторы со смешанным возбуждением.

При параллельной работе генераторов со смешанным возбуждением (рис. 69) их обмотки последовательного возбуждения соединяют между собой уравнительной шиной. При наличии такой шины обмотки оказываются включенными параллельно. Если те-

перь э. д. с. какого-либо генератора неожиданно возрастет и он примет на себя часть нагрузки, то возросший в цепи его якоря ток увеличит ток в последовательной обмотке другого генератора. Магнитный поток этого генератора возрастет, его э.д.с. также увеличится, и нагрузки вновь автоматически распределятся между генераторами пропорционально их мощностям.

Порядок включения генераторов со смешанным возбуждением на параллельную работу аналогичен включению на параллельную работу генераторов с параллельным возбуждением. Нельзя вводить в параллельную работу генератор до замыкания уравнительного провода.

Сечение уравнительного провода согласно правилам Речного Регистра СССР должно быть не менее 50% сечения главных шин.

Этими же Правилами установлено, что генераторы с параллельным возбуждением применяются на судах лишь при наличии быстродействующих автоматических регуляторов напряжения или для питания исключительно осветительных установок.

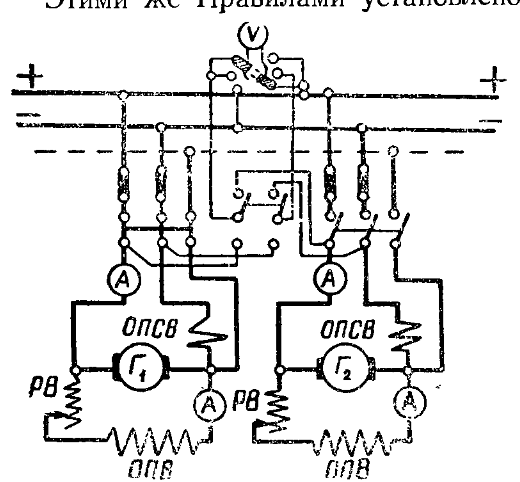


Рис. 69. Схема параллельной работы генераторов со смешанным возбуждением

Как правило, должны применяться генераторы со смешанным возбуждением.

Для защиты генераторов от чрезмерных перегрузок и обратного тока, в случае перехода генераторов в двигательный режим при их параллельной работе, должны устанавливаться автоматические выключатели максимального тока с выдержкой времени и реле обратного тока.

На главном распределительном щите судовой электростанции для каждого генератора обычно выделяется своя панель, на которой монтируются коммутационные, защитные и электроизмерительные приборы, предназначенные для данного генератора:

1) при независимой работе одного или нескольких генераторов на панели каждого генератора устанавливают двухполюсный автоматический выключатель максимального тока с выдержкой времени, амперметр и вольтметр;

2) при параллельной работе нескольких генераторов с параллельным возбуждением на панели каждого генератора устанавливают двухполюсный автоматический выключатель максимального и обратного тока с выдержкой времени, амперметр и вольтметр;

3) при параллельной работе нескольких генераторов со смешанным возбуждением на панели каждого генератора устанавливают трехполюсный автоматический выключатель максимального и обратного тока с выдержкой времени (на двух фазах), амперметр, вольтметр, приспособление для подмагничивания (на всю установку).

При мощности судовой электрической станции до 25 *квт* вместо автоматических выключателей допускается установка рубильников с предохранителями на каждом полюсе или фазе (но не в уравнительном проводе).

Кроме перечисленных приборов, на главном распределительном щите должен быть установлен вольтметр для измерения сопротивления изоляции, имеющий шкалу, проградуированную в омах.

## § 29. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Кроме описанных выше генераторов постоянного тока, применяемых в качестве основных источников тока, изготовляются специальные генераторы постоянного тока, например генераторы с тремя обмотками, электросварочные генераторы, электромашинные усилители и др.

Электрические генераторы с тремя обмотками (генераторы с размагничивающей обмоткой) применяются в ряде схем судовых электрических приводов, в частности в схемах генератор — двигатель.

Ряд судовых электрических двигателей работает с резкопеременной нагрузкой, например, рулевые электрические привода. В отдельных случаях возможно полное затормаживание двигателей. При этом в обмотке якоря развивается ток весьма большой величины, который может вызвать аварию машины, если напряжение питающей сети не будет снижено. Применение генераторов с размагничивающей обмоткой позволяет автоматически снижать напряжение в сети при опасных перегрузках электрических двигателей.

Электрические генераторы с размагничивающей обмоткой имеют три обмотки возбуждения: обмотку независимого возбуждения ОНВ, получающую питание от постороннего источника тока; обмотку параллельного возбуждения ОПВ и обмотку последовательного возбуждения ОПСВ. Магнитные потоки обмоток независимого и параллельного возбуждения складываются и образуют общее магнитное поле машины. Магнитный поток обмотки последовательного возбуждения направлен навстречу основному магнитному потоку и ослабляет его.

Витки обмоток рассчитаны таким образом, что при номинальных нагрузках и небольших перегрузках действие размагничивающей обмотки (последовательного возбуждения) незначительно.

При больших перегрузках, когда ток в цепи якоря достигает опасных значений, размагничивающее действие обмотки последовательного возбуждения вызывает резкое снижение общего магнитного потока машины, что в свою очередь ведет к понижению напряжения на зажимах генератора.

На рис. 70 показана схема генератора с размагничивающей обмоткой и его соединение с двигателем-исполнителем. Как видно из схемы, обмотка якоря двигателя включена последовательно с обмоткой якоря генератора и его размагничивающей обмоткой. Такое соединение называется электрическим валом.

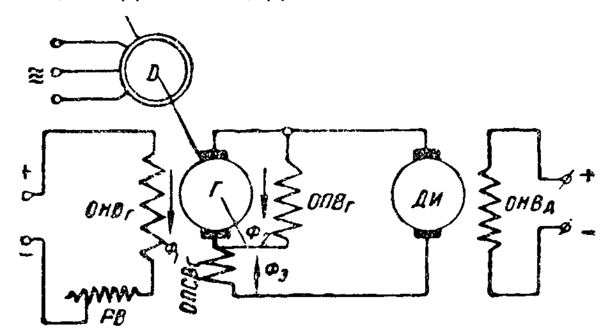



Рис. 70. Схема генератора с размагничивающей обмоткой

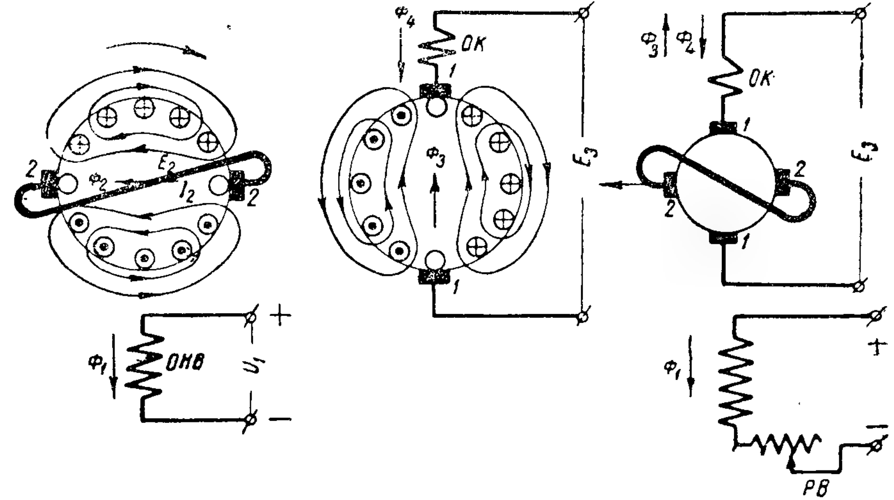



Рис. 71. Принцип действия генератора с поперечным магнитным полем

Электросварочные генераторы и электромашинные усилители (ЭМУ) относятся к генераторам постоянного тока с поперечным магнитным полем (рис. 71).

У генераторов с поперечным магнитным полем обмотка возбуждения получает питание от постороннего

источника тока. Создаваемый ею поток $\Phi_1$ наводит в обмотке якоря э.д.с. $E_2$, направление которой определяется по правилу правой руки. На поверхности коллектора располагаются две пары щеток: одна пара *1-1* по центральной оси полюсов, другая *2-2* на геометрической нейтрали. Щетки *2-2* замкнуты накоротко соединительным проводником. Щетки *1-1* соединены с внешней цепью. Под действием э.д.с. $E_2$ в замкнутой цепи щеток *1-1* и обмотке якоря возникает ток $I_2$, создающий магнитный поток $\Phi_2$, значительно превышающий по величине поток $\Phi_1$. Поток $\Phi_2$ направлен поперек магнитного потока $\Phi_1$, создаваемого полюсами, вследствие чего он называется поперечным магнитным потоком. Поперечный поток наводит в обмотке якоря э.д.с. $E_3$. Результирующая э.д.с. $E_3$ снимается щетками *1-1* и создает во внешней цепи и обмотке якоря ток $I_3$, значительно больший тока $I_1$.

Ток $I_3$, проходя по обмотке якоря, создает магнитный поток $\Phi_3$ (реакция якоря), направление которого противоположно направлению основного магнитного потока $\Phi_1$, и уменьшает его. Для устранения размагничивающего действия потока $\Phi_3$ реакции якоря на полюсах машины размещается компенсационная обмотка *ОК*, включенная последовательно с внешней цепью. Она создает поток $\Phi_4$, который направлен против потока $\Phi_3$ реакции якоря и уничтожает его.

Преимущество генератора с поперечным магнитным полем состоит в том, что при сравнительно небольшом токе в обмотке возбуждения можно получить значительный ток во внешней цепи.

Электромашинный усилитель относится к числу электрических машин, позволяющих осуществлять непрерывное автоматическое управление в электрических приводах.

Особенно широкое применение электромашинные усилители получили в схемах электрического движения судов.

Электромашинный усилитель представляет собой генератор с поперечным полем. Его обмотка возбуждения имеет незначительное число витков и является обмоткой управления. Изменение тока возбуждения производится при помощи потенциометра.

В обычном генераторе получается по существу однократное усиление подводимой к обмотке возбуждения мощности.

Если обозначить мощность, подводимую к обмотке возбуждения обычного генератора, через $I_1U_1$, а мощность, получаемую во внешней сети, через $I_2E_2$, коэффициент усиления генератора будет:

$$k_{y_1} = \frac{I_2E_2}{I_1U_1}.$$

Это — первая ступень усиления мощности. Она получается за счет того, что малый поток $\Phi_1$ создает малую э.д.с. $E_2$, которая вызывает появление значительного тока $I_2$ и соответственного поперечного потока $\Phi_2$. Ток $I_2$ получается большим потому, что провод, соединяющий щетки *2-2*, обладает ничтожно малым сопротивлением.

Поток $\Phi_2$ наводит в обмотке якоря вторую э.д.с. $E_3$, которая является источником электрической энергии для внешней цепи, присоединенной ко второй паре щеток *1-1*. В этой цепи создается ток $I_3$. Таким образом, получается вторая ступень усиления мощности

$$k_{y_2}=\frac{I_3E_3}{I_2E_2}.$$

Эта ступень усиления получилась за счет того, что вместо малой э.д.с. $E_2$ большим магнитным потоком $\Phi_2$ создается значительная э.д.с. $E_3$.

Отсюда отношение мощности, получаемой на выходе усилителя, к мощности, подводимой к обмотке возбуждения (управления) машины равно:

$$k_y=k_{y_1}k_{y_2}=\frac{E_2I_2}{U_1I_1}\cdot\frac{E_3I_3}{E_2I_2}=\frac{E_3I_3}{U_1I_1}.$$

Кроме поперечного потока $\Phi_2$, имеется еще и продольный поток, созданный током $I_3$, который размагничивает основное поле. Для предотвращения размагничивающего действия продольного потока на полюсах помещается компенсационная обмотка ОК, м. д. с. которой равна и противоположна продольной реакции якоря.

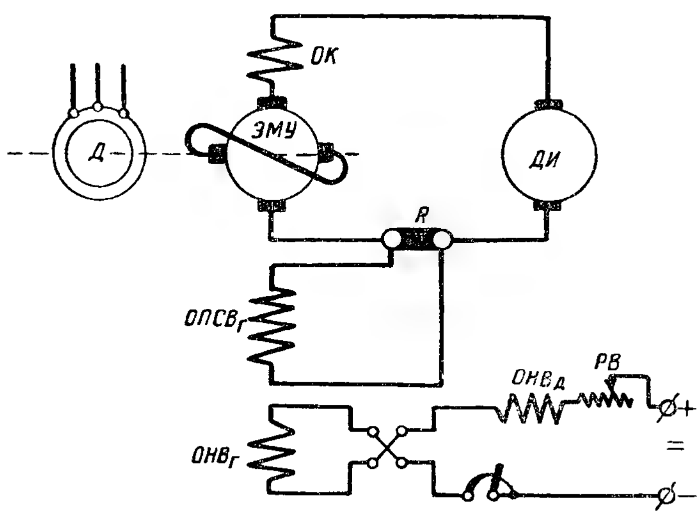



Рис. 72. Схема генератор-двигателя с электромашинным усилителем

Общий коэффициент усиления достигает значения $10^4$ и более. Так, изменяя в обмотке возбуждения мощность на 1 *вт*, можно на выходе усилителя изменить мощность на 10 *квт*.

В качестве примера использования электромашинного усилителя для автоматического управления на рис. 72 приводится схе-

ма электропривода по системе генератор-двигатель. В этой схеме ЭМУ является генератором, питающим электрической энергией двигатель-исполнитель ДИ, приводящий в действие какой-либо механизм. Назначением ЭМУ в данном случае является поддержание постоянства тока в цепи якоря двигателя и обеспечение постоянства его пускового момента. ЭМУ имет три обмотки возбуждения: обмотку независимого возбуждения ОНВ, обмотку последовательного возбуждения ОПСВ и компенсационную обмотку ОК.

Магнитный поток $\Phi_1$ обмотки последовательного возбуждения ОПСВ направлен против основного магнитного потока $\Phi_0$, создаваемого обмоткой независимого возбуждения ОНВ . Соответствующим подбором сопротивления цепи возбуждения ОНВ и сопротивления $r$ получают в цепи якоря ток заданной величины.

Если ток в цепи возрастет, м. д. с. обмотки последовательного возбуждения ОПСВ увеличится, размагничивающее действие обмотки усилится, основной магнитный поток уменьшится и ток в цепи якоря снизится.

При уменьшении тока в цепи якоря уменьшится м. д. с. обмотки последовательного возбуждения ОПСВ, результирующий ток увеличится, ток в цепи якоря возрастет.

Электромашинные усилители обладают большой чувствительностью и быстротой реагирования (большой отзывчивостью).

Генераторы с поперечным магнитным полем используются также и в сварочных машинах. К сварочным генераторам предъявляются следующие требования: 1) напряжение, подводимое к электрической дуге, должно иметь крутопадающую внешнюю характеристику, чтобы обеспечить постоянство сварочного тока независимо от напряжения; 2) сварочная цепь должна выдерживать ток короткого замыкания.

В процессе сварки расстояние между электродами непостоянно, что приводит к резкому изменению величины сопротивления цепи, и, как следствие этого, к изменению напряжения. В то же время величина тока должна меняться незначительно.

В сварочном генераторе с поперечным полем применяется система расщепленных полюсов.

Два северных полюса $N_1$ и $N_2$ образуют как бы один полюс, $N$, так же как и два южных полюса $S_1$ и $S_2$ — полюс $S$.

Одна пара полюсов $N_1S_1$ имеет сравнительно небольшое сечение, а вторая пара $N_2S_2$—значительно большее сечение. Обмотки возбуждения полюсной системы соединены последовательно и присоединены к положительной щетке внешней цепи и к третьей щетке.

Когда генератор работает, появляется поперечная реакция якоря, поток которой направлен по прямой, проходящей через основные щетки. Если разложить поток $\Phi_a$ по направлениям осей полюсов $N_1S_1$ и $N_2S_2$, то слагающая $\Phi_{a_1}$ совпадет по направле-

нию с магнитным потоком $\Phi_1$ и усилит его, а слагающая $\Phi_{a_2}$ направлена против потока $\Phi_2$ и размагничивает это поле. Но при этом поток $\Phi_1$ изменяется незначительно, так как полюсы $N_1$ и $S_1$ насыщены из-за малого сечения, а поток $\Phi_2$ меняется сильно, так как у полюсов $N_2$ и $S_2$ имеется значительно большее сечение. При увеличении нагрузки величина суммарного поля уменьшится, а следовательно, уменьшится напряжение и во внешней цепи.

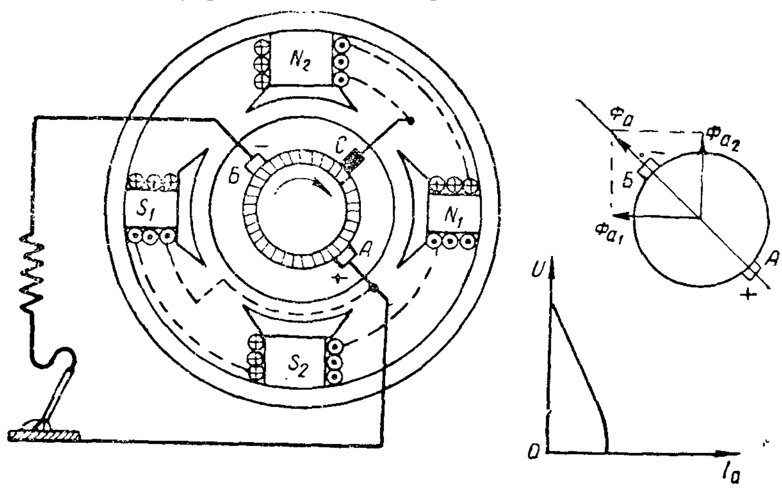



Рис. 73. Схема сварочного генератора с поперечным магнитным полем

С другой стороны, напряжение на обмотке возбуждения останется почти таким же, так как оно зависит от потока на оси $N_1S_1$, который очень мало изменяется.

Таким образом, сварочный ток будет мало зависеть от напряжения во внешней цепи, о чем можно судить по внешней характеристике такого генератора, приведенной на рис. 73.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как подразделяются генераторы по способу возбуждения?
2. Как происходит процесс самовозбуждения генератора?
3. Как производится регулировка напряжения генератора?
4. Что называется характеристиками генератора и какие зависимости определяют основные характеристики?
5. Что отображает характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением, каков ее характер?
6. Как снимаются характеристики холостого хода?
7. Какую зависимость отображает нагрузочная характеристика и в чем ее отличие от характеристики холостого хода?
8. Как строится характеристический треугольник и что обозначают его катеты?
9. Какую зависимость отображает внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением и как она строится?
10. Что отображает регулировочная характеристика?
11. Как строятся по характеристическому треугольнику внешняя и регулировочная характеристики?

12. Какова схема включения в сеть генератора с параллельным возбуждением и как протекает процесс его самовозбуждения?

13. Какой характер имеет внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением?

14. Какими особенностями обладает генератор с последовательным возбуждением?

15. От чего зависят свойства генератора со смешанным возбуждением?

16. Каково назначение обмотки последовательного возбуждения в генераторе со смешанным возбуждением?

17. Каковы условия параллельной работы генераторов?

18. Как вводится генератор в параллельную работу?

19. Как распределяется нагрузка между параллельно работающими генераторами?

20. В чем особенность параллельной работы генераторов со смешанным возбуждением?

21. Какие потери различают в электрических машинах?

22. Чему равен к.п.д. электрических генераторов?

23. В каких случаях используются генераторы с размагничивающей обмоткой?

24. Как работают генераторы с поперечным магнитным полем и в чем их особенность?

25. Каков принцип действия и какова область применения электромашинного усилителя?

26. Как устроен сварочный генератор с поперечным магнитным полем?

*Глава V*

# РАБОТА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ДВИГАТЕЛЯ

## § 30. ОБРАТИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Одна и та же электрическая машина постоянного тока может без всяких конструктивных изменений работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

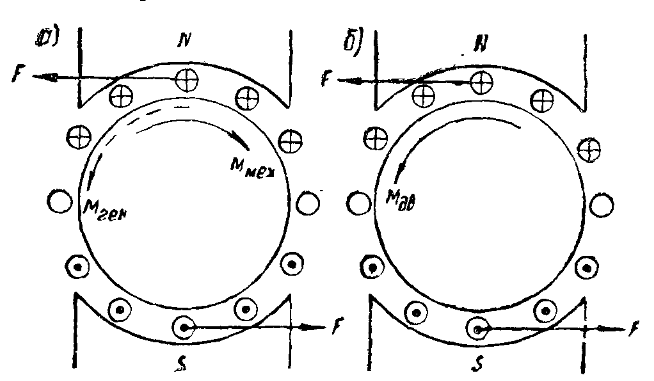



Рис. 74. Работа машин постоянного тока в режимах генератора и двигателя

Если якорь электрической машины (рис. 74) вращать, например, по часовой стрелке, то на каждый проводник его обмотки

будет действовать сила $F = BI_a l$. Эти силы и создаваемый ими тормозной момент $M_{тр}$ направлены навстречу механической силе и моменту $M_{мех}$ первичного двигателя и являются тормозящими (рис. 74, *а*). В этой машине, являющейся генератором, механическая энергия преобразуется в электрическую.

Если машину отсоединить от первичного двигателя и подвести к ней ток от какого-либо постороннего источника тока, сохранив при этом прежнее направление тока в обмотке якоря и полярность полюсов (рис. 74, *б*), то силы электромагнитного взаимодействия будут действовать в прежнем направлении, а создаваемый ими момент $M_{вр}$ будет стремиться привести якорь машины во вращение в направлении своего действия, т. е. в сторону, обратную направлению вращения генератора. Развиваемый машиной момент будет вращающим, и она станет работать в двигательном режиме. Способность одной и той же электрической машины работать как в качестве генератора, так и в качестве двигателя называется обратимостью электрических машин.

В соответствии с принципом обратимости электрических машин электрические двигатели подразделяются по системе возбуждения на двигатели:

1) с параллельным возбуждением;
2) с последовательным возбуждением;
3) со смешанным возбуждением.

## § 31. УРАВНЕНИЕ РАВНОВЕСИЯ МОМЕНТОВ

При вращении якоря электродвигателя в магнитном поле машины его проводники будут пересекать магнитные силовые линии поля машины и в них будет наводиться э.д.с. Величина ее определяется так же, как и величина э. д. с. у генераторов, по формуле $E = k_e n \Phi$. По отношению к току, проходящему по обмотке якоря, она будет направлена против него. Поэтому эта э.д.с. называется обратной или противодействующей (противо-э.д.с.).

Для того чтобы преодолеть противодействие, оказываемое обратной э.д.с. прохождению электрического тока по обмотке якоря, напряжение питающей цепи должно быть больше этой э.д.с.

Величина приложенного напряжения должна компенсировать противо-э.д.с., наводимую в обмотке якоря, и падение напряжения в цепи якоря электродвигателя, т. е. должна быть равна

$$U = E + I_a r_a,$$

где:

$E$ — величина противо-э.д.с ($E = k_e n \Phi$) в *в*;

$I_a$ — ток в цепи якоря в *а*;

$r_a$ — полное сопротивление цепи якоря в *омах*.

Из уравнения э.д.с. ток в обмотке якоря электродвигателя равен

$$I_a = \frac{U - E}{r_a} = \frac{U - k_e n \Phi}{r_a}.$$

Напряжение, подводимое к двигателю, обычно постоянно, и ток в обмотке якоря зависит в основном от величины противо-э.д.с.

Для устойчивой работы двигателя необходимо, чтобы развиваемый им вращающий момент $M_{вр}$ был равен моменту сопротивления $M_c$. Если бы этого равновесия не было, то двигатель либо развивал бесконечно большое число оборотов, либо останавливался.

В двигателях равновесие моментов $M_{вр}=M_c$ поддерживается автоматически.

Величина момента зависит от величины тока в якоре $M=k_м\Phi_a$. Противо-э.д.с. является своеобразным регулятором тока в якоре и косвенно способствует поддержанию равновесия моментов на валу машины.

Предположим, что скорость вращения двигателя уменьшится, уменьшится и противо-э.д.с. $(E=k_e n\Phi)$, наводимая в обмотке якоря.

Уменьшение противо-э.д.с. сразу же повлечет за собой увеличение тока, так как ток зависит от величины противо-э.д.с.

Момент вращения машины постоянного тока пропорционален току в обмотке якоря $M=k_м\Phi I_a$ и с увеличением тока возрастет до величины момента сопротивления. Равновесие моментов будет вновь восстановлено.

Точно так же при увеличении скорости вращения двигателя противо-э.д.с. увеличится, ток уменьшится, соответственно уменьшится вращающий момент и уравновесится с моментом сопротивления.

Отсюда следует, что ток и мощность двигателя, забираемые из сети, зависят при сохранении равновесия моментов исключительно от нагрузки на его валу, т. е. от момента сопротивления.

Полный момент, развиваемый двигателем, должен быть больше момента сопротивления на его валу на величину потерь холостого хода (механические потери), т. е.

$$M=M_c+M_0,$$

где:

$M_c$ — момент полезной нагрузки;

$M_0$ — момент потерь холостого хода.

При неустановившемся режиме, что может быть при разгоне, остановке или регулировании числа оборотов двигателя, следует учитывать также динамический момент, определяемый инертностью вращающихся масс $\left(M_j=I\frac{d\omega}{dt}\right)$. При этом полный момент равен

$$M=M_c+M_0+M_j. \qquad (83)$$

## § 32. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для оценки работы электрических двигателей пользуются их характеристиками, представляющими собой графические изображения основных зависимостей между электрическими и механическими величинами, определяющими работу двигателей. Основными характеристиками двигателей являются: пусковые, рабочие (в том числе механические) и регулировочные.

Пусковые характеристики определяются пусковым током $I_{пуск}$ пусковым моментом $M_{пуск}$ и временем пуска в ход.

Рабочие характеристики определяют зависимости: $n=f(P_2)$; $M=f(P_2)$; $I=f(P_2)$ и $\eta=f(P_2)$ при $U=U_н=\text{const}$ и $I_в=\text{const}$.

Зависимость $n=f(P_2)$ называется скоростной характеристикой. Эта характеристика при неизменном напряжении ($U=\text{const}$) зависит только от падения напряжения в цепи якоря $I_a r_a$ и изменения потока $\Phi$.

К рабочим характеристикам двигателя относятся также механические характеристики, показывающие зависимость $n=f(M)$ при $U=\text{const}$ и $r_p=\text{const}$. При этом различают:

1) сверхжесткую механическую характеристику в тех случаях, когда число оборотов двигателя не меняется при изменении нагрузки;

2) жесткую механическую характеристику, когда число оборотов двигателя при изменении нагрузки меняется незначительно;

3) мягкую механическую характеристику, когда число оборотов двигателя в сильной степени зависит от нагрузки.

Форма и расположение характеристик сильно меняется при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений. Получающиеся при этом характеристики, показывающие зависимость $I_в=f(I_a)$ при $n=\text{const}$, называются регулировочными.

## § 33. ПУСК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ХОД

В начальный момент пуска двигателя его якорь неподвижен и величина противо-э.д.с., наводимой в обмотке якоря, равна нулю ($E=0$). Отсюда, ток в якоре двигателя равен

$$I_a=\frac{U}{r_a}.$$

Сопротивление цепи якоря очень невелико (доли *ома*), и в момент пуска пусковой ток превышает величину номинального тока в 10—25 раз. Если напряжение сети постоянного тока равно 220 *в*, номинальный ток двигателя 20 *а*, а сопротивление обмотки якоря 0,5 *ом*, то ток в момент пуска будет равен $I=\frac{U}{r_a}=\frac{220}{0,5}=440\,а$, т. е. будет превышать величину номинального тока в 22 раза.

Конечно, такой ток опасен для целости обмотки якоря. Кроме того, пусковой момент пропорционален току. Чрезмерный пусковой момент может вызвать механические повреждения.

Для снижения пускового тока на время пуска двигателя последовательно с обмоткой якоря в цепь якоря вводится добавочное сопротивление — пусковой реостат. Величина сопротивления реостата выбирается по допустимому пусковому току.

Кратность пускового тока для наиболее распространенных типов двигателей постоянного тока при наличии добавочного сопротивления принимается равной (1,8—2,5).

Из уравнения наибольшего допустимого пускового тока

$$I_{пуск}=\frac{U}{r_a+r_{доб}}=(1,8\div2,5)I_н \qquad (84)$$

может быть определена величина сопротивления пускового реостата.

Решая вышеприведенное уравнение в отношении $r_{доб}$, получаем формулу для определения величины сопротивления пускового реостата.

$$r_p=r_{доб}=\frac{U}{I_{пуск}}-r_a \quad [ом].$$

**Пример.** Определить сопротивление пускового реостата для пуска электрического двигателя постоянного тока типа ПН-28,5 мощностью 2,8 *квт*, потребляющего номинальный ток $I_н=32a$, при номинальном напряжении 110 *в*, если сопротивление обмотки якоря двигателя равно $r_a=0,3$ *ом*, а допустимая кратность тока равна $2,2I_н$.

Решение. Так как кратность пускового тока $\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}=2,2$, то допустимая величина пускового тока будет $I_{пуск}=32\cdot2,2=70,4$ *а*.

Определяем сопротивление пускового реостата

$$r_{доб}=r_p=\frac{U}{I_{пуск}}-r_a=\frac{110}{70,4}-0,3\approx1,26 \text{ ом}.$$

Для пуска двигателя без нагрузки вращающий момент его может быть небольшим, так как момент сопротивления на валу машины отсутствует и двигателю необходимо преодолевать лишь момент потерь холостого хода и момент инерции, которые по своей величине незначительны.

Однако при пуске двигателя под нагрузкой вращающий момент должен быть значительно больше, так как он должен преодолеть момент сопротивления нагрузки на валу и ее (если он имеется) дополнительный динамический момент.

Пусковой реостат делают многоступенчатым. В начале пуска вводится все сопротивление реостата, чтобы ограничить пусковой ток, при отсутствии в якоре двигателя противо-э.д.с. По мере увеличения числа оборотов якоря двигателя в нем наводится проти-

во-э.д.с., которая ограничивает величину тока. Постепенно, выводя сопротивление реостата из цепи якоря ступень за ступенью, увеличивают подводимое к цепи якоря напряжение, с тем чтобы оно уравновешивало возрастающую противо-э.д.с. и в то же время пусковой ток был ограничен. Количество ступеней реостата определяется условиями плавности пуска двигателя.

Кроме реостатного пуска электрических двигателей, иногда применяется пуск с постепенным повышением напряжения, подводимого к двигателю.

Во многих электрических схемах приводов большое значение имеет возможность изменения направления вращения двигателя. Направление вращения якоря определяется направлением тока в обмотке якоря и в обмотке возбуждения. Отсюда ясно, что для изменения направления вращения необходимо изменить направление тока или в обмотке якоря или в обмотке возбуждения. При одновременном изменении направления тока в обмотке якоря и обмотке возбуждения направление вращения якоря не изменится.

Значительно чаще для изменения направления вращения якоря меняют направление тока в обмотке якоря, а не в обмотке возбуждения, так как изменение направления тока в обмотке возбуждения связано с перемагничиванием полюсов машины, что нежелательно. Кроме того, переключение концов обмотки возбуждения связано с возникновением значительной э. д. с. самоиндукции, вызывающей искрение у контактов переключателя.

## § 34. РЕГУЛИРОВКА СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Возможность регулировать скорость вращения двигателей постоянного тока является их весьма важным свойством, в значительной степени определившим достаточно широкое применение этих двигателей в судовых условиях, подъемно-транспортных установках и т. п.

Из уравнения э. д. с.

$$E=k_e n\Phi=U-I_a r_a$$

скорость вращения якоря электрического двигателя равна

$$n=\frac{E}{k_e\Phi}=\frac{U-I_a r_a}{k_e\Phi}.$$

Из формулы видно, что скорость вращения якоря зависит от напряжения питающей сети, величины тока в цепи якоря, сопротивления цепи якоря и величины магнитного потока. Регулируя ту или другую из указанных величин, можно изменять в известных пределах скорость вращения якоря.

Возможность и широта диапазона регулировки числа оборотов двигателя характеризуется: пределами, плавностью и экономичностью регулирования.

Под пределами регулирования ($k_{пр}$) понимают отношение наибольшего числа оборотов $n_{нб}$ к наименьшему $n_{нм}$, которое может быть получено при регулировании, т. е.

$$k_{пр} = \frac{n_{нб}}{n_{нм}}. \qquad (85)$$

Предел регулирования обычно дается в виде отношения 2 : 1; 5 : 1; 10 : 1 и т. д.

Под плавностью регулирования $k_{пл}$ понимают отношение числа оборотов двух соседних ступеней регулирования

$$k_{пл} = \frac{n_{m+1}}{n_m}, \qquad (86)$$

где:

$n$ — число оборотов двигателя в об/мин;

$m$ — число ступеней регулирования.

Регулировать число оборотов двигателя путем изменения подводимого к нему напряжения можно по специальной схеме генератор-двигатель (см. рис. 72). В этой схеме для питания двигателя установлен специальный генератор, с которым двигатель связан электрическим валом. Напряжение на зажимах генератора изменяется путем регулирования величины тока в его обмотке возбуждения. Этот способ позволяет очень плавно и в широких пределах изменять число оборотов двигателя. Однако при этом требуется установка специального агрегата, первичного двигателя и генератора для питания электрической энергией двигателя-исполнителя. Поэтому данный способ регулирования числа оборотов двигателя применяется лишь в специальных схемах электрических приводов, например в схемах электропривода руля, брашпиля, шпиля и т. п.

Регулирование скорости вращения якоря введением в цепь его добавочного сопротивления позволяет изменять число оборотов только в сторону их уменьшения, что видно из формулы $n = \frac{U - I_a(r_a + r_{доб})}{k_e \Phi}$. Когда в цепь якоря вводится добавочное сопротивление, ток в цепи якоря в первый момент пуска уменьшается $\left(I_a = \frac{U - E}{r_a + r_{доб}}\right.$ при $U = \text{const}$), уменьшается и вращающий момент ($M = k_м I_a \Phi$ при $\Phi = \text{const}$), который оказывается меньше тормозного момента $M_c$. Число оборотов двигателя при этом естественно снизится. Снижение числа оборотов повлечет уменьшение противо-э. д. с., что в свою очередь приведет к увеличению тока до первоначальной величины. Таким образом, введение добавочного сопротивления в цепь якоря двигателя приводит к уменьшению числа оборотов по сравнению с номинальным. При этом величины тока и момента в конечном результате остаются неизменными при условии $U = \text{const}$; $I_в = \text{const}$ и $\Phi = \text{const}$.

Рассмотренный способ регулировки числа оборотов двигателя прост в эксплуатационном отношении, но обладает рядом существенных недостатков; а именно:

1) возрастают потери мощности в цепи, так как

$$U=E+I_a(r_a+r_{доб}).$$

Если обе части этого равенства умножить на величину тока $I_a$, то

$$UI_a=EI_a+I_a^2(r_a+r_{доб}),$$

где:

$UI_a=P$ — мощность, потребляемая двигателем из сети, в *квт;* она остается постоянной, так как $I_a$ =const; $M$=const; $\Phi$=const;

$EI_a=P_э$— электрическая мощность, преобразуемая в механическую, в *квт*; эта мощность пропорциональна числу оборотов, так как $E=k_e \Phi n$; $I_a$=const; $\Phi$=const;

$I_a^2(r_a+r_{доб})=P_{пот}$ — мощность потерь в *квт,* возрастающая с увеличением добавочного сопротивления $r_{доб}$; $r_a$=const;

2) габариты реостата должны быть рассчитаны на прохождение через него всего тока нагрузки; реостаты получаются громоздкими;

3) регулировка числа оборотов возможна лишь в сторону их уменьшения.

Регулировка скорости вращения якоря путем введения в цепь его добавочного сопротивления применяется лишь для двигателей небольшой мощности.

Регулировка числа оборотов двигателя путем изменения магнитного потока машины получила наиболее широкое распространение.

Изменение магнитного потока $\Phi$ возможно путем изменения тока возбуждения. Проще всего это достигается введением в цепь возбуждения добавочного сопротивления. Сопротивление цепи возбуждения изменяется при помощи регулировочного реостата. Магнитный поток машины в зависимости от тока возбуждения изменяется в соответствии с кривой намагничивания.

Если пренебречь насыщением стали магнитной цепи, можно считать, что $\Phi=kI_в$, где $k$ — коэффициент пропорциональности. Тогда

$$n=\frac{U-I_ar_a}{kI_в}.$$

Этим способом скорость вращения якоря может меняться достаточно плавно и в довольно широких пределах. Следует, однако, иметь в виду, что уменьшение магнитного потока $\Phi$ вызывает увеличение тока в цепи якоря, так как $I=\frac{M}{k_м\Phi}$; $M$=const.

Повышение тока при увеличении числа оборотов машины ухудшает условия коммутации тока, и пределы регулировки при этом ограничивают таким образом, чтобы поток машины не ослаблялся более чем на 25—30%.

Так как ток в цепи возбуждения сравнительно небольшой (3—5% номинального), размеры реостата будут невелики и потеря мощности в нем незначительна.

## § 35. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

У двигателя с параллельным возбуждением обмотка якоря и обмотка возбуждения образуют две параллельные ветви (рис. 75). Ток, потребляемый двигателем, равен

$$I = I_a + I_в. \quad (87)$$

К обмотке якоря приложено определенное неизменное постоянное напряжение ($U$=const). Сопротивление реостата возбуждения выбирается с таким расчетом, чтобы при номинальном напряжении и номинальной нагрузке скорость вращения двигателя также была номинальной.

Тогда ток в цепи возбуждения будет постоянным $\left(I_в = \frac{U}{r_в + r_p} = \text{const}\right)$, не зависящим от тока в обмотке якоря, т. е. от нагрузки.

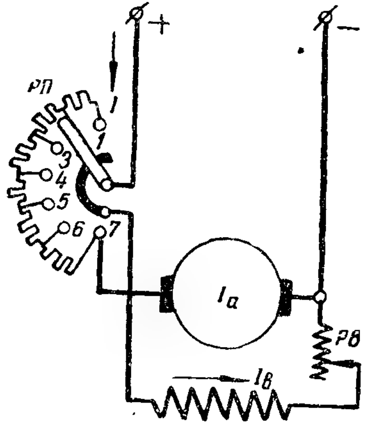



Рис. 75. Схема двигателя с параллельным возбуждением

Это основное свойство двигателя с параллельным возбуждением.

Зависимость числа оборотов от величины тока в якоре и от вращающего момента [$n = f(I_a)$ и $n = f(M)$] вытекает из уравнения противо-э. д. с., а именно,

$$E = U - I_a(r_a + r_p) = k_e n \Phi.$$

Из этого равенства следует, что

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{r_a + r_p}{k_e \Phi} I_a.$$

Если в эту формулу подставить значение $I_a = \frac{M}{k_м \Phi}$, получим выражение механической характеристики

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{r_a + r_p}{k_e k_м \Phi^2} M.$$

Обе формулы, выражающие зависимость числа оборотов от тока в якоре и момента, представляют собой уравнение прямой линии, так как в пределах номинальной нагрузки величина магнитного потока $\Phi$ может считаться постоянной, приложенное напряжение и сопротивление обмотки якоря также постоянны ($U$=const, $r_a$=const).

Выражение $\frac{r_a+r_p}{k_e\Phi}$ принято называть **коэффициентом «мягкости»** характеристики, оно представляет собой тангенс угла наклона характеристики к оси абсцисс. Чем больше угол наклона характеристики, тем значительнее изменяется число оборотов двигателя с изменением нагрузки, тем «мягче» характеристика.

Различают естественную и искусственную механические характеристики (рис. 76).

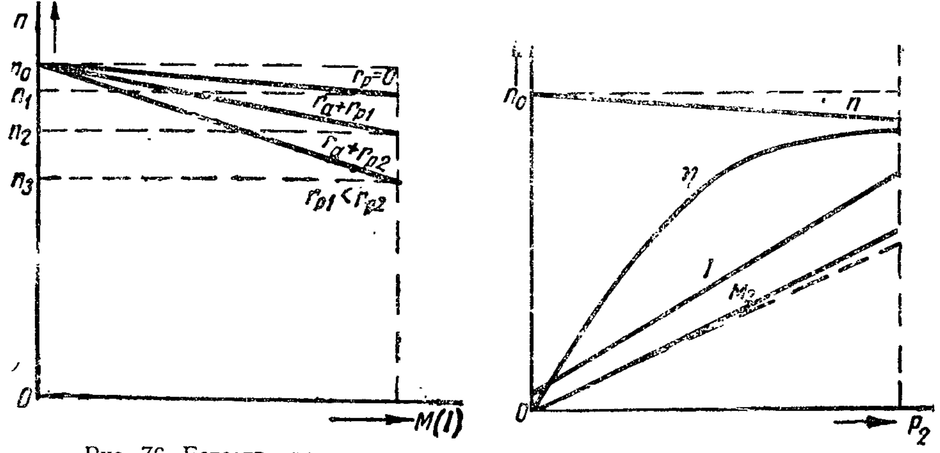



Рис. 76. Естественная и искусственная механические характеристики

Рис. 77. Рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением

Естественные характеристики получаются, когда $r_p$=0. С увеличением сопротивления цепи якоря, т. е. с вводом в нее дополнительного сопротивления, наклон характеристики увеличивается, и характеристика становится мягче.

Самой жесткой является естественная характеристика.

Рабочие характеристики показывают зависимости основных величин, определяющих работу двигателя, от его полезной мощности $P_2$ при неизменных напряжении $U$=const и токе возбуждения $I_в$=const; т. е.: $n=f(P_2)$; $M_2=f(P_2)$; $\eta=f(P_2)$; $I=f(P_2)$.

Скоростная характеристика двигателя с параллельным возбуждением (рис. 77) имеет вид почти прямой несколько наклонной в сторону оси абсцисс, так как скорость двигателя при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной меняется очень незначительно, примерно в пределах 3—8%. Уменьшение числа оборо-

тов, если пренебречь влиянием реакции якоря и считать $\Phi$=const, происходит только вследствие увеличения падения напряжения $I_a r_a$ в цепи якоря двигателя.

Поэтому двигатель с параллельным возбуждением имеет жесткую характеристику.

Если считать, что скорость двигателя $n$ при изменении нагрузки остается постоянной, то момент $M_2=975\frac{P_2}{n}$ был бы прямо пропорционален мощности и зависимость $M_2=f(P_2)$ имела бы вид прямой, выходящей из начала координат. В действительности скорость вращения с изменением мощности несколько изменяется, что придает характеристике некоторую криволинейность. Полезный вращающий момент при отсутствии нагрузки равен нулю.

Зависимость тока якоря от мощности на валу $I_a=f(P_2)$ при $U$ = const, $I_в$=const, $\Phi$ = const, $n$=const) вытекает из следующих соотношений (считая приближенно $M=M_2$):

$$M = k_м I_a \Phi; \quad P_2 = \frac{Mn}{975} = \frac{k_м I_a \Phi n}{975},$$

откуда

$$I_a = 975 \frac{P_2}{k_м n \Phi}.$$

Величина тока в якоре изменяется пропорционально мощности на валу машины.

Пуск в ход двигателя с параллельным возбуждением возможен как при помощи пускового реостата, так и по схеме генератор-двигатель путем постепенного повышения напряжения на зажимах двигателя.

На рис. 78 дана схема двигателя параллельного возбуждения, пуск которого осуществляется при помощи пускового реостата. Секции сопротивлений пускового реостата присоединены к контактам, по которым скользит контактная щетка. Одновременно контактная щетка скользит по контактной полосе, к которой присоединена обмотка возбуждения двигателя.

Через контактную полосу обмотка возбуждения двигателя с первого же момента его включения оказывается под полным напряжением сети. Регулировочный реостат в цепи возбуждения при пуске двигателя должен быть полностью выведен. При этом ток в обмотке возбуждения двигателя, его магнитный поток и вращающий момент будут иметь наибольшие значения, что будет способствовать быстрому пуску двигателя в ход.

В первый момент пуска контактная щетка пускового реостата устанавливается на контакте *1*. При этом в цепь якоря двигателя включены все секции пусковых сопротивлений. Так как в пер-

вый момент пуска якорь двигателя еще неподвижен ($n=0$ и $E=0$), ток в обмотке якоря равен

$$I_{п.нб}=\frac{U}{r_a+\Sigma r_p},$$

где $\Sigma r_p$ — суммарное сопротивление всех секций реостата.

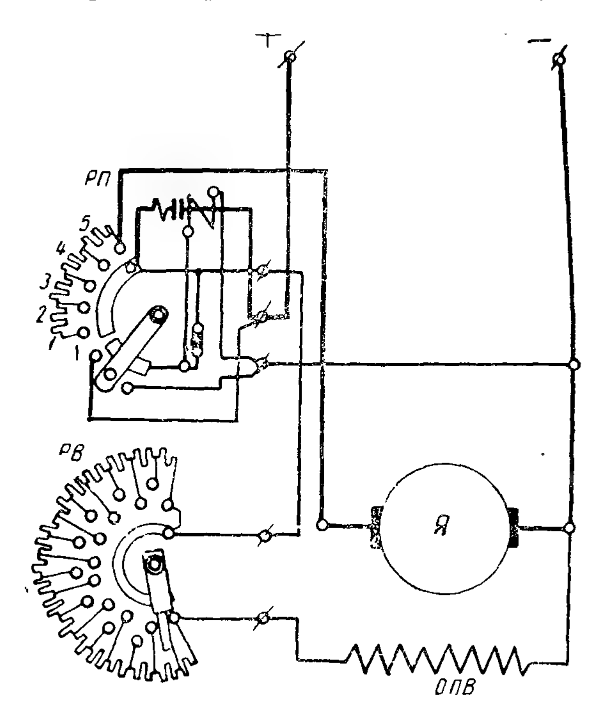



Рис. 78. Схема реостатного пуска двигателя с параллельным возбуждением

В соответствии с этим током в двигателе создается пусковой момент $M_{пуск}=k_м I_{п.нб}\Phi$, и двигатель с некоторым ускорением, величина которого определяется соотношением пускового и нагрузочного моментов, начнет вращаться. При этом в обмотке якоря будет наводиться противо-э.д.с., пропорциональная скорости $n$. Ток соответственно росту противо-э.д.с, а также пропорциональный ему пусковой момент начнут уменьшаться до некоторой величины $I_{п.нм}$.

При выборе реостата необходимо руководствоваться пределами, в которых может колебаться величина тока в якоре или пусковой момент. Наибольший предел пускового момента (тока) выбирается, исходя из установленной кратности тока для данного двигателя и необходимой величины избыточного момента. Обыч-

но величину наибольшего момента принимают порядка 1,5—2 номинального момента. Наименьшая величина пускового момента определяется статическим моментом ($M_{мин} \leqslant M_{ст}$).

После того как ток уменьшится до величины $I_{п.нм}$, контактную щетку переводят на контакт 2. При этом оказывается выключенной из цепи первая секция пускового реостата. Сопротивление цепи якоря уменьшится, и ток в ней возрастет до величины $I_{п.нб}$; возрастет и пусковой момент. Скорость двигателя увеличится, что вызовет соответствующее увеличение противо-э. д. с. и уменьшение тока до момента $I_{п.нм}$.

Дальнейший перевод контактной щетки на контакты 3, 4 и выключение соответствующих секций пускового реостата будут сопровождаться сначала увеличением тока до $I_{п.нб}$, а затем с увеличением скорости двигателя и ростом противо-э.д.с. его уменьшением до величины $I_{п.нм}$. При выключении последней секции реостата двигатель разовьет номинальное число оборотов и будет работать по естественной характеристике.

Сопротивление секций реостата рассчитывается таким образом, чтобы момент и ток при выключении очередной секции не превышали определенной величины $I_{п.нб}$, $M_{п.нб}$.

При выключении последней секции реостата двигатель переходит на работу по естественной характеристике.

Регулировочные характеристики (рис. 79) позволяют графически определить сопротивление секций реостата. Отрезок *АБ* в определенном масштабе равен полной величине сопротивления реостата, отрезок *БВ*—величине сопротивления якоря $r_a$. Масштаб сопротивлений устанавливается делением известной величины сопротивления якоря на длину отрезка *БВ*. Сопротивление отдельных секций реостата и всего реостата в целом определяется графически пропорционально масштабу полученных отрезков. С увеличением числа секций достигается бо́льшая плавность пуска двигателя и уменьшается разница между наибольшим и наименьшим моментом, что ускоряет пуск двигателя в ход.

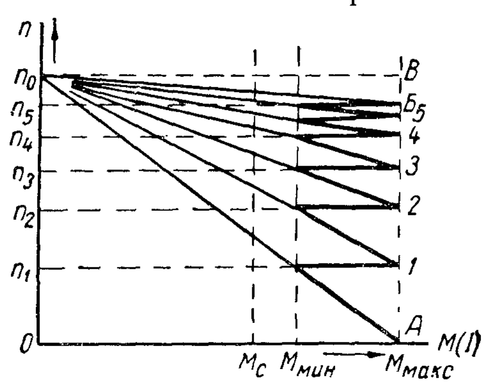



Рис. 79. Регулировочная характеристика

Число оборотов двигателя с параллельным возбуждением можно регулировать способами, описанными в § 34.

Наиболее широко применяется регулировка скорости вращения двигателя при помощи регулировочного реостата, включаемого последовательно в цепь возбуждения двигателя.

Однако при этом надо учитывать, что введением сопротивления в цепь возбуждения двигателя можно лишь увеличивать скорость вращения, так как этим самым уменьшается ток возбуждения, а следовательно и магнитный поток, число же оборотов двигателя обратно пропорционально магнитному потоку, как это следует из формулы

$$n=\frac{U-I_a(r_a+r_{доб})}{k_e\Phi}.$$

Зависимость числа оборотов двигателя от тока возбуждения $n=f(I_в)$ при отсутствии нагрузки называется **характеристикой холостого хода** (рис. 80). Как видно из данной характеристики, ток возбуждения можно уменьшать лишь до определенного предела, так как при чрезмерном его уменьшении скорость двигателя слишком возрастет, что будет угрожать целости двигателя.

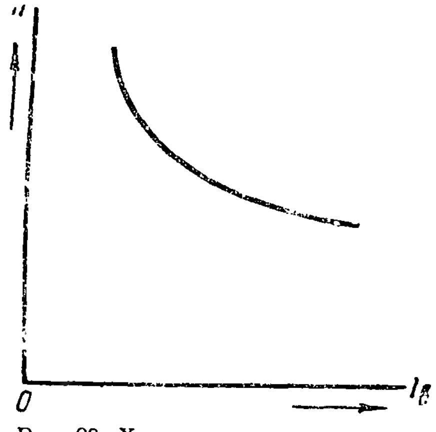


Рис. 80. Характеристика холостого хода

Когда требуется уменьшить число оборотов двигателя по сравнению с номинальным, скорость вращения регулируют путем изменения подводимого к двигателю напряжения по специальным схемам, например по схеме генератор-двигатель.

Двигатели с параллельным возбуждением широко используются в тех случаях, когда при длительном режиме работы не требуется регулировка числа оборотов в широких пределах. В судовых условиях они применяются для приводов насосов, вентиляторов, компрессоров и других механизмов с устойчивым режимом работы.

## § 36. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

У двигателей с последовательным возбуждением обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря (рис. 81).

При отсутствии в цепи возбуждения добавочных сопротивлений через обмотку якоря и обмотку возбуждения проходит один и тот же ток, т. е.

$$I_в=I_a.$$

Вращающий момент для ненасыщенной машины пропорционален квадрату тока в якоре, так как $M=k_м I_a \Phi$, в то же время $\Phi=kI_в$, а $I_в=I_a$, откуда $M=k'I_a^2$.

По мере насыщения стали величина магнитного потока приближается к постоянному значению и характеристика момента становится прямолинейной (рис. 81).

Ввиду того, что магнитный поток машины у двигателей с последовательным возбуждением находится в прямой зависимости от нагрузки, эти двигатели обладают «мягкой» характеристикой, т. е. их число оборотов резко меняется в зависимости от нагрузки. Это видно из отношения

$$n=\frac{U-I_a(r_a+r_в)}{k_e\Phi}=\frac{U-I_a(r_a+r_в)}{k'I_a},$$

так как $\Phi=kI_в=k'I_a$.

С увеличением нагрузки увеличивается магнитный поток и уменьшается скорость.

При перегрузках и насыщении стали машины поток становится почти постоянным, и скоростная характеристика приобретает прямолинейную форму.

При уменьшении нагрузки будет уменьшаться ток $I_a$ и магнитный поток $\Phi$, а, следовательно, скорость вращения будет расти. При значительном уменьшении нагрузки двигатель может развить скорость, превышающую механически допустимые пределы, что может привести к повреждению машины. Поэтому двигатели с последовательным возбуждением **нельзя пускать в ход** при небольших нагрузках и **вхолостую**.

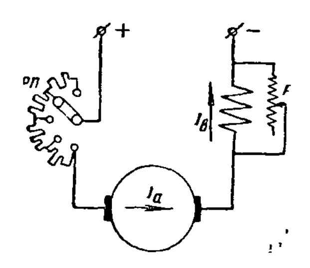



Рис. 81. Схема двигателя с последовательным возбуждением

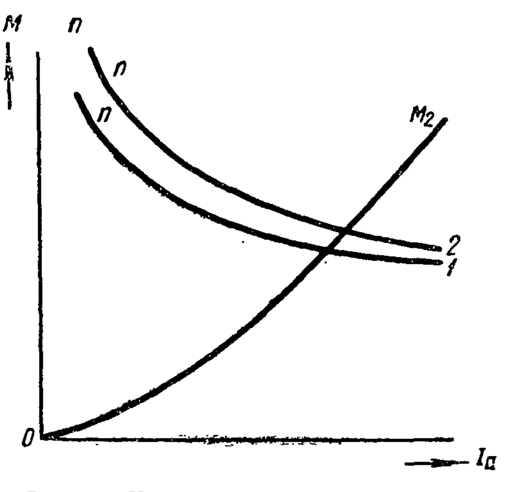



Рис. 82. Характеристика числа оборотов и момента двигателя с последовательным возбуждением:
1—естественная; 2—регулировочная

Из рассмотренных характеристик (см. рис. 77 и рис. 82) следует, что при малых нагрузках, когда ток возбуждения двигателя незначителен, он развивает вращающий момент меньший, чем двигатель с параллельным возбуждением одинаковой мощности. Однако при нагрузках выше номинальной их возрастающий момент значительно больше момента двигателей с параллельным

возбуждением. При этом, однако, двигатель с последовательным возбуждением при вращающих моментах, меньших номинального, потребляет мощность большую, чем равные им по мощности двигатели с параллельным возбуждением, а при моментах, больших номинального, потребляет мощность меньшую, чем такие же двигатели с параллельным возбуждением.

Пуск в ход двигателей с последовательным возбуждением осуществляется с помощью пусковых сопротивлений, последовательно выключаемых из цепи якоря по мере увеличения скорости вращения двигателя. Так как двигатели пускаются в ход под нагрузкой при полном рабочем токе, пусковые сопротивления должны быть рассчитаны на прохождение через них этого тока. Поэтому пусковые реостаты получаются очень громоздкими. Пусковые сопротивления комплектуются в специальные ящики сопротивлений. Выключение отдельных секций сопротивлений производится при помощи специального коммутирующего прибора — контроллера.

Скорость вращения двигателя регулируется либо введением в цепь якоря сопротивления, либо изменением магнитного потока.

Наиболее распространен первый способ регулирования числа оборотов, несмотря на то, что он связан с потерями мощности.

Если в цепь якоря ввести регулировочное сопротивление, то потери напряжения в цепи якоря увеличатся в соответствии с величиной сопротивления и величиной нагрузки ($\Delta U = I_a r_p$). Напряжение на зажимах двигателя уменьшится, и число оборотов двигателя снизится, так как

$$n = \frac{U - I_a(r_a + r_в + r_p)}{k_e \Phi}$$

Потеря мощности в реостате прямо пропорциональна напряжению на реостате и обратно пропорциональна напряжению на зажимах двигателя. Она определяется из отношения

$$\frac{P_p}{P_{дв}} = \frac{I_a U_p}{I_a U_{дв}} = \frac{U_p}{U_{дв}},$$

где:

$P_p$ — потеря мощности в реостате в *квт*;
$P_{дв}$ — мощность, потребляемая двигателем из сети, в *квт*;
$U_p$ — напряжение на зажимах реостата в *в*;
$U_{дв}$ — напряжение на зажимах двигателя в *в*;
$I_a$ — ток в цепи якоря двигателя в *а*;

Регулирование скорости вращения двигателя изменением магнитного потока достигается включением параллельно обмотке возбуждения регулировочного реостата РР (см. рис. 81). При этом уменьшается величина тока возбуждения, проходящего через обмотку возбуждения, так как часть тока цепи якоря будет ответвляться в регулировочный реостат и ток возбуждения будет равен:

$$I_в = I_a - I_p.$$

Уменьшение тока возбуждения и магнитного потока позволяет увеличивать число оборотов двигателя. Однако при этом с уменьшением нагрузки число оборотов двигателя будет возрастать еще быстрее, чем при естественной характеристике (см рис. 82, характеристики *1* и *2*).

Увеличение скорости вращения двигателей с последовательным возбуждением при уменьшении их нагрузки и уменьшение скорости при значительных нагрузках позволяет широко использовать их в подъемно-транспортных установках.

Большой пусковой момент имеет значение для механизмов, пуск которых производится при значительных перегрузках.

Поэтому в судовых условиях эти двигатели применяются в электрических приводах шпилей и брашпилей.

## § 37. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Двигатели со смешанным возбуждением имеют две обмотки: параллельную ОПВ и последовательную ОПСВ (рис. 83). Эти обмотки могут включаться согласно, когда их м. д. с. складываются, и встречно, когда их м. д. с вычитаются. Свойства двигателей со смешанным возбуждением зависят от соотношения м. д. с., создаваемых обеими обмотками.

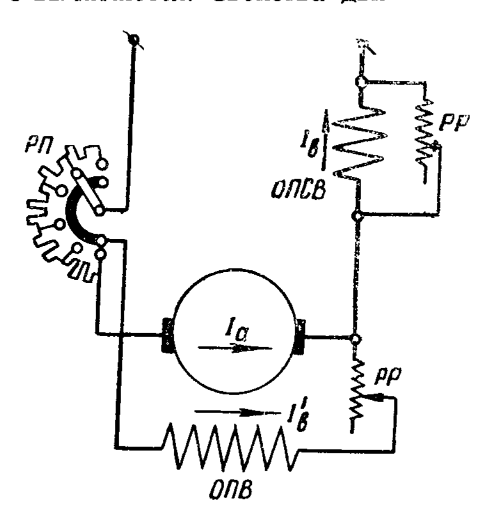


Рис. 83. Схема двигателя со смешанным возбуждением

Когда преобладает м. д. с. обмотки параллельного возбуждения, двигатель по своим свойствам приближается к двигателям с параллельным возбуждением. При преобладании м. д. с. обмотки последовательного возбуждения, что бывает сравнительно редко, двигатель по своим свойствам приближается к двигателям с последовательным возбуждением. Механическая характеристика двигателей со смешанным возбуждением мягче, чем у двигателей с параллельным возбуждением, и жестче, чем у двигателей с последовательным возбуждением.

При согласном включении обмоток число оборотов двигателя равно:

$$n = \frac{U - I_a(r_a + r_{пос})}{k_e(\Phi_{пос} + \Phi_{пар})}.$$

Вращающий момент двигателя со смешанным возбуждением равен:

$$M = k_м I_a (\Phi_{пос} + \Phi_{пар}).$$

Так как магнитный поток обмотки параллельного возбуждения постоянен, а магнитный поток обмотки последовательного возбуждения зависит от нагрузки, то характер кривой зависимости $M=f(I_a)$ определяется соотношением м. д. с. обмоток машины. Во всех случаях пусковой момент двигателя со смешанным возбуждением больше пускового момента двигателя с параллельным возбуждением.

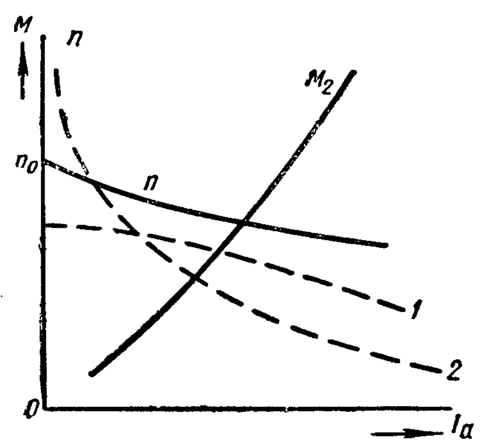


Рис. 84. Характеристики двигателя со смешанным возбуждением

Так как при холостом ходе и внезапном сбросе нагрузки обмотка параллельного возбуждения двигателя со смешанным возбуждением создает достаточный магнитный поток, этот двигатель может пускаться в ход на холостом ходу.

Примерные характеристики двигателя со смешанным возбуждением приводятся на рис. 84. Пунктиром даются для сравнения скоростные характеристики двигателей с параллельным (кривая *1*) и последовательным (кривая *2*) возбуждением.

Обычно у двигателей со смешанным возбуждением обмотка параллельного возбуждения имеет 60—80% всей м. д. с.

Однако выпускаются крановые двигатели и с равными м. д. с. у обеих обмоток.

В судовых условиях двигатели со смешанным возбуждением широко применяются в схемах электроприводов палубных механизмов: рулевых приводов, приводов шпилей, брашпилей, грузоподъемных установок.

## § 38. ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Кроме различных способов механического торможения, основанных на трении, для быстрой остановки двигателей широко используется электрическое торможение.

Электрическое торможение основано на создании в двигателе тормозного момента, по направлению противоположному вращающему моменту, а при отключении двигателя — моменту инерции.

Применяются три вида электрического торможения: электродинамическое, торможение с отдачей энергии в сеть и торможение противотоком.

Электродинамическое торможение производится путем отключения обмотки якоря двигателя от сети и замыкания ее на тормозное сопротивление (рис. 85). При этом обмотка возбуждения двигателей с параллельным возбуждением остается под напряжением, т. е. $\Phi = \text{const}$. Так как напряжение на зажимах якоря двигателя равно нулю ($U = 0$), то и ток в цепи якоря от сети также равен нулю ($I_a = 0$). Однако якорь машины продолжает вращаться по инерции и наводимая в его обмотке э. д. с. создает в обмотке якоря ток. Последний имеет направление, обратное направлению тока, который протекал по обмотке якоря до отключения ее от сети. Значит, создаваемый этим током момент будет направлен в сторону, противоположную вращению якоря, т. е. будет тормозным моментом.

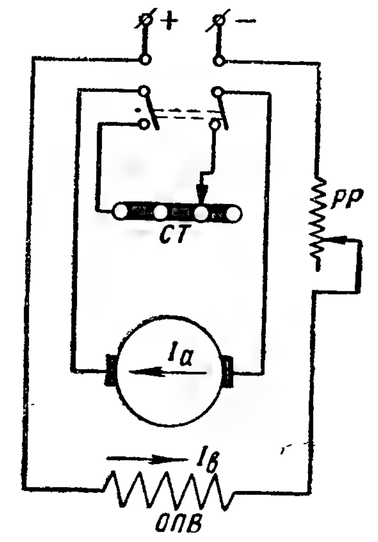



Рис. 85. Схема электродинамического торможения двигателя с параллельным возбуждением

Величина тока в обмотке якоря определяется из отношения:

$$I_T = -\frac{E}{r_a + r_T}.$$

Тормозной момент равен:

$$M_T = -k_м I_T \Phi = -k_м \frac{E}{r_a + r_T}\Phi = -k_e k_м \frac{n\Phi^2}{r_a + r_T}.$$

Знак минус показывает, что речь идет о тормозном моменте.

Из вышеприведенной формулы видно, что тормозной момент при постоянном магнитном потоке зависит от тока, величина которого определяется величиной э.д.с., прямо пропорциональной скорости вращения и обратно пропорциональной сопротивлению цепи якоря. По мере затормаживания число оборотов двигателя падает и тормозной момент уменьшается. Для поддержания величины тормозного момента более или менее постоянным, тормозное сопротивление, на которое замыкается обмотка якоря, делается секционированным. Тогда, по мере уменьшения скорости вращения якоря, постепенно выводят одну секцию тормозного сопротивления за другой и тем поддерживают величину тока и тормозной момент.

Выше было отмечено, что обмотка возбуждения остается под напряжением. При этом возможны два случая, когда обмотка

возбуждения получает питание от основной сети (рис. 86, *а*) и находится под полным напряжением (тогда двигатель работает в режиме генератора с независимым возбуждением) и когда обмотка возбуждения включается параллельно якорю (рис. 86,*б*) и двигатель работает в режиме генератора с самовозбуждением. (Для примера взят двигатель с последовательным возбуждением.) Во втором случае в начальный момент э.д.с. в обмотке якоря равна остаточной э.д.с. Так как цепь обмотки якоря и обмотки возбуждения представляет собой замкнутую цепь, то под действием проходящего по ней тока машина возбуждается и в ней развивается тормозной момент, пропорциональный току. Чаще применяется первый способ питания обмотки возбуждения.

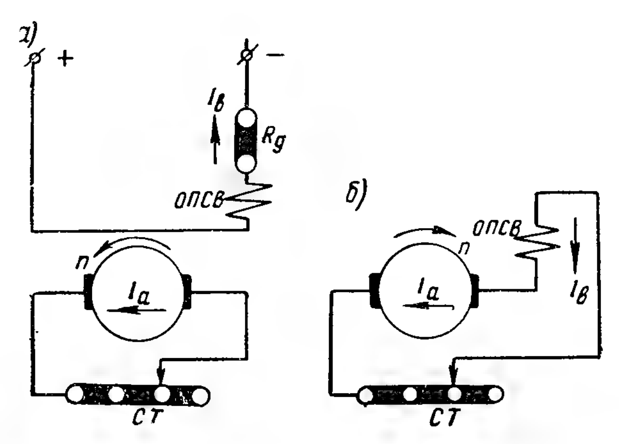



Рис. 86. Схема электродинамического торможения двигателя с последовательным возбуждением

Основной недостаток электродинамического торможения состоит в том, что для полной остановки двигателя необходимо сравнительно много времени, так как при малом числе оборотов тормозной момент будет очень мал.

Электродинамическое торможение широко применяется в схемах электрических приводов, имеющих двигатели с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

Торможение двигателей с последовательным возбуждением при помощи замыкания обмотки якоря на сопротивление имеет свои особенности. Обмотка возбуждения двигателя с последовательным возбуждением имеет малое число витков и малое омическое сопротивление.

Поэтому при отключении обмотки якоря двигателя от сети и замыкании ее на тормозное сопротивление, последовательно с обмоткой возбуждения, остающейся под полным напряжением сети должно включаться дополнительное, достаточно большое сопротивление, с тем, чтобы ток возбуждения не превышал номинальной величины.

Если питание обмотки возбуждения осуществляется по принципу самовозбуждения, то при переводе машины на тормозной режим обмотка якоря и последовательно включенная с нею обмотка возбуждения замыкаются на тормозное сопротивление (см. рис. 86, *б*).

В первый момент переключения э.д.с. во вращающемся якоре наводится за счет остаточной индукции полюсов. Так как цепь замкнута, в ней появляется ток, который усиливает индукцию полюсов и вызывает увеличение э.д.с. в обмотке якоря. С увеличением э.д.с. увеличивается и ток, т. е. происходит обычный процесс самовозбуждения машины, которая в данном случае должна рассматриваться как генератор с последовательным возбуждением.

Так как направление момента генератора противоположно направлению момента двигателя, то развиваемый машиной момент будет тормозным, т. е. направленным против направления вращения якоря двигателя.

Величина тормозного момента определяется величиной тока в якоре. Однако в начальный момент торможения ток в якоре мал и тормозной момент также незначителен. По мере самовозбуждения машины ток будет увеличиваться, будет расти и тормозной момент.

Величина тормозного момента зависит и от величины тормозного сопротивления. Если тормозное сопротивление будет велико, то тормозной момент будет мал. От величины тормозного сопротивления зависит и время торможения.

Торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперацией) основано на переходе двигателя постоянного тока в генераторный режим. Как известно, для этого нобходимо, чтобы э.д.с., наводимая в обмотке якоря (противо-э.д.с.), была больше напряжения внешней сети.

Э. д. с. пропорциональна числу оборотов машины ($E{=}k_e n \Phi$). Если увеличить число оборотов сверх номинального, то э.д.с. возрастет и станет больше вышеуказанного напряжения. Ток и момент при этом изменят свое направление. Момент станет тормозным.

Торможение с отдачей энергии в сеть широко применяется на железнодорожном транспорте. Для этого специальный генератор постоянного тока создает устойчивое магнитное поле в обмотках возбуждения. Тяговые двигатели переходят на генераторный режим и отдают энергию в сеть. Одновременно происходит торможение.

Мощность, отдаваемая двигателем, находящимся в тормозном режиме, в сеть равна:

$$P_T = P_м \eta_п \eta_э, \qquad (88)$$

где:

$P_T$ — мощность, развиваемая механизмом;

$\eta_п$ — к. п. д. передач;

$\eta_э$ — к. п. д. электрической машины.

Этот вид торможения применяется как для двигателей с параллельным возбуждением, так и для двигателей со смешанным возбуждением.

При торможении двигателя со смешанным возбуждением с отдачей энергии в сеть его обмотка последовательного возбуждения должна замыкаться накоротко, так как при изменении направления тока в цепи обмотки якоря изменится и направление тока в обмотке последовательного возбуждения и будет происходить размагничивание машины.

Торможение противотоком (противовключением) осуществляется переключением концов обмотки якоря. В результате этого направление тока в цепи якоря изменится, изменится и направление момента, который теперь будет направлен против вращения якоря, т. е. будет развиваться тормозной момент. Особенность этого способа торможения заключается в том, что при переключении концов обмотки якоря э. д. с., наводимая в нем, будет иметь одинаковое направление с напряжением сети, сложится с ним, и ток в цепи якоря, и тормозной момент будут равны:

$$I = \frac{U+E}{r_a+r_T}; \quad M_T = -k_м \Phi \frac{U+E}{r_a+r_T} = -k_м \Phi \frac{U+k_e n \Phi}{r_a+r_T}.$$

Увеличение напряжения почти вдвое, особенно в начале торможения, требует введения в цепь якоря значительного тормозного сопротивления $r_T$ для ограничения тока.

Торможение противотоком обеспечивает быструю остановку двигателя ввиду большого тормозного момента. При этом, однако, двигатель должен быть своевременно выключен, чтобы он не приобрел обратного вращения. Развивающийся в цепи якоря большой ток может быть опасен для состояния машины. Поэтому этот способ торможения применяют обычно лишь в аварийных случаях.

Необходимо также отметить, что при торможении противотоком возникают дополнительные потери мощности.

Торможение противотоком может применяться для остановки всех трех типов двигателей постоянного тока.

## § 39. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 87 показаны энергетические диаграммы машин постоянного тока: генератора с независимым возбуждением (рис. 87, *а*) и двигателей постоянного тока (рис. 87, *б*).

В электрических генераторах происходит преобразование механической мощности $P_{мех}$, получаемой от первичного двигателя, в электрическую мощность $P_2$, отдаваемую генератором в сеть.

Преобразование энергии сопровождается потерями. Эти потери можно подразделить на следующие группы: электрические потери $P_м$ (или потери в меди) и потери в контакте щеток $P_щ$, магнитные потери $P_{ст}$ (или потери в стали), механические потери $P_{мех}$, добавочные потери $P_{доб}$.

Кроме того, имеют место потери в обмотке возбуждения $P_в$, которая у генераторов с независимым возбуждением получает питание от независимого источника тока.

Механические потери и потери в стали покрываются за счет механической мощности. Мощность $P_{эм}$ представляет собой электромагнитную мощность, которая определяется как разность

$$P_{эм}=P_1-(P_{мех}+P_{ст}) \quad (89)$$

Мощность $P_2$ определяется из электромагнитной мощности за вычетом потерь в меди и щеточных контактах. Она равна:

$$P_2=P_{эм}-(P_м+P_щ) \quad (90)$$

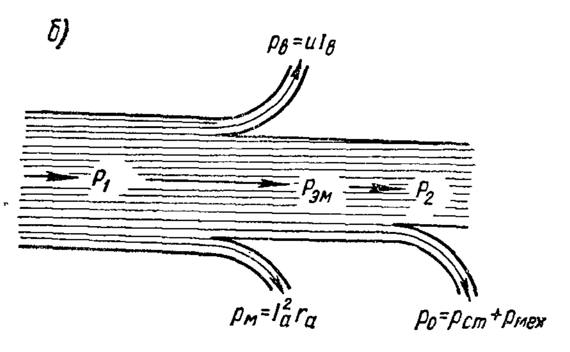



Рис. 87. Энергетическая диаграмма:
*а*—генераторы с независимым возбуждением; *б*—двигатель постоянного тока

В двигателях постоянного тока (см. рис. 87,б) происходит преобразование электрической мощности $P_1$, подводимой к двигателю из сети, в механическую мощность $P_2$, развиваемую двигателем на валу.

Часть полной электрической мощности, подводимой к двигателю, затрачивается на покрытие потерь в цепи возбуждения $P_в=UI_в$, в цепи якоря $I_a^2 r_a$ и щеточном контакте. Поэтому

$$P_{эм}=P_1-(UI_в+I_a^2 r_a)=P_1-(P_в+P_м). \quad (91)$$

Полная механическия мощность определяется из мощности $P_{эм}$ за вычетом потерь холостого хода $P_0$, т. е. потерь в стали и механических потерь. Она равна

$$P_2=P_{эм}-P_0=P_{эм}-(P_{ст}+P_{мех}). \quad (92)$$

Часть потерь, создающихся в машинах постоянного тока, зависит от величины нагрузки машин и может быть отнесена к переменным потерям, другая часть потерь не зависит от нагрузки и является постоянными потерями. Таким образом, общие потери могут быть выражены формулой.

$$P_{общ}=P_{пер}+P_{пост}. \qquad (93)$$

К переменным потерям относятся потери, связанные с выделением тепла в обмотке якоря и обмотке возбуждения. Это так называемые электрические потери. Указанные потери определяются согласно закону Ленца-Джоуля по формуле

$$P_{пер}=I_a^2 r. \qquad (94)$$

Тогда общие потери могут быть найдены по формуле:

$$P_{общ}=P_{пост}+I_a^2 r. \qquad (95)$$

Если $I_a^2$ выразить через мощность, зная, что $I_a=\frac{P}{U}$, то

$$P_{общ}=P_{пост}+\frac{r}{U_a^2}P^2 \qquad (96)$$

или

$$P_{общ}=P_{пост}+\sigma P^2, \qquad (97)$$

где $\sigma=\frac{r}{U^2}$.

Отношение постоянных потерь к переменным при номинальной нагрузке $P_{ном}$ можно обозначить через коэффициент $a$:

$a=\frac{P_{пост}}{P_{пер}}=\frac{P_{пост}}{\sigma P_{ном}^2}$, тогда

$$\sigma=\frac{P_{пост}}{a}\cdot\frac{1}{P_{ном}^2},$$

а общие потери составят

$$P_{общ}=P_{пост}+\frac{P_{пост}}{a}\cdot\frac{P^2}{P_{ном}^2}=P_{пост}+\frac{P_{пост}}{a}x^2, \qquad (98)$$

где $a$ — коэффициент отношения постоянных потерь к переменным;

x — отношение фактической нагрузки машины к номинальной.

Электрические потери $P_{эл}$ складываются из потерь на нагревание меди обмоток якоря, возбуждения, дополнительных полюсов, компенсационной обмотки и, наконец, из потерь в

щеточном контакте. Потери в меди, как было указано выше, являются переменными и определяются по формуле

$$P_м=I^2r,$$

где:

$I$ — величина тока, протекающего по обмоткам, в *а;*
$r$ — омическое сопротивление обмоток в *ом.*

Сопротивление обмоток, согласно нормам, определяется при температуре 75° С. Если температура обмотки отличается от указанной в нормах, то ее сопротивление пересчитывается применительно к температуре 75° С по формуле

$$r=r_0(1+\alpha\tau), \qquad (99)$$

где:

$r_o$ — сопротивление обмотки в холодном состоянии;
$\alpha$ — температурный коэффициент сопротивления металла, равный для меди $\alpha=0{,}004$;
$\tau$ — разность температур $(t_2—t_1)$.

**Пример.** При температуре воздуха $t_1=20°$ С сопротивление обмотки при нагревании ее до 75° С будет равно:

$$r=r_0(1+\alpha\tau)=r_0(1+0{,}004\cdot 55)=1{,}22r_0,$$

$$\text{где } \tau=(t_2-t_1)=75-20=55°\text{C}.$$

Потери в меди также могут быть определены по падению напряжения на соответствующих участках цепей, а именно

$$P_м=\Delta UI, \qquad (100)$$

где $\Delta U$ — падение напряжения в обмотках в *в.*

Для щеточного контакта потери определяются по формуле

$$P_щ=2\Delta UI, \qquad (101)$$

где $\Delta U$ — падение напряжения на щетках одной полярности (для угольных щеток $\Delta U$=0,5—1 *в,* для медноугольных $\Delta U$=0,3—0,5 *в*).

Электрические потери составляют

$$P_{эл}=P_a+P_в+P_{доп}+P_щ, \qquad (102)$$

где:

$P_a$ — потери в обмотке якоря;
$P_в$ — потери в обмотках возбуждения (сумма потерь в обмотках параллельного и последовательного возбуждения);
$P_{доп}$ — потери в обмотке дополнительных полюсов;
$P_щ$ — потери в щеточном контакте.

Магнитные потери или потери в стали возникают в сердечнике якоря при его вращении в магнитном поле. Они складываются из потерь на гистерезис (потери, связанные с перемагничиванием стали) и потерь на вихревые токи.

В процессе перемагничивания стали зубцов и сердечника якоря, попеременно попадающих в сферу действия то северного, то южного полюсов, выделяется теплота. Количество выделенной теплоты пропорционально площади петли гистерезиса. Мощность, расходуемая на гистерезис, пропорциональна частоте перемагничивания, зависящей от скорости вращения якоря $n$, и квадрату величины магнитной индукции $B$, т. е.

$$P_г=f(B,n).$$

Величина потерь на гистерезис в ваттах определяется по формуле

$$P_г=\sigma_г\frac{f}{100}B^2G \quad [вт], \qquad (103)$$

где:

$\sigma_г$ — коэффициент, зависящий от сорта стали (для стали марки Э1 $\sigma_г=4{,}4—4{,}7$; для трансформаторной стали $\sigma_г=2{,}4—3$);

$f=\frac{fn}{60}$ — частота перемагничивания;

$B$ — магнитная индукция в $в \cdot сек/м^2$;

$G$ — вес стали в *кг*.

Потери на вихревые токи, возникающие также в сердечнике и зубцах якоря, зависят от скорости вращения якоря и величины магнитной индукции, т. е. $P_{в.т.}=f(B,n)$.

Они определяются в ваттах по формуле

$$P_{в.т}=\sigma_{в.т}\left(\frac{f}{100}B\right)^2G \quad [вт], \qquad (104)$$

где $\sigma_{в.т}$ — коэффициент, зависящий от сорта и толщины стали (при толщине стали 0,5 *мм* $\sigma_{в.т}=1{,}2—5{,}6$).

Значения коэффициентов $\sigma_г$ и $\sigma_{в.т.}$ для стали марки Э1 и трансформаторной стали приведены в табл. 6.

Таблица 6

| Сорт стали | Толщина в *мм* | $\sigma_г$ | $\sigma_{в.т}$ |
|---|---|---|---|
| Сталь марки Э1 . . . . . | 1,0 | 4,4 | 22,4 |
| | 0,5 | 4,4 | 5,6 |
| | 0,35 | 4,7 | 3,2 |
| Трансформаторная сталь . . . . | 0,5 | 3,0 | 1,2 |
| | 0,35 | 2,4 | 0,6 |

Общие потери в стали равны:

$$P_{ст}=P_г+P_{в.т}. \qquad (105)$$

Механические потери складываются из потерь на трение в подшипниках, потерь от трения о воздух вращающихся

частей машины, потерь от трения щеток о коллектор, потерь на вентиляцию.

Мощность механических потерь зависит только от скорости вращения якоря и не зависит от нагрузки, т. е. $P_{мех}=f(n)$.

Потери мощности в подшипниках определяются по формуле

$$P_{мех}=9{,}81k_{тр}F_n v_ц \ [вт], \quad (106)$$

где:

$k_{тр}$ — коэффициент трения в подшипнике;
$F_n$ — давление на подшипник в *кг*;
$v_ц$ — скорость вращения цапфы в *м/сек*.

Судовые электрические машины изготовляются на шарико- и роликоподшипниках, и потери на трение в подшипниках составляют в них 1—2% мощности машины в зависимости от числа оборотов.

Потери на трение щеток о коллектор определяются по формуле

$$P_к=9{,}81k_{тр}F_щ v_м S_щ \ [вт], \quad (107)$$

где:

$k_{тр}$ — коэффициент трения щеток о коллектор; $k_{тр}=0{,}1—0{,}3$;
$F_щ$ — удельное давление щеток на коллекторе; $F_щ=0{,}15—0{,}3$ *кГ/см*$^2$;
$v_м$ — окружная скорость коллектора в *м/сек*;
$S_щ$ — площадь контакта щеток с коллектором в *см*$^2$.

Вентиляционные потери определяются по формуле

$$P_в=1{,}1Av_в^2 \ [вт], \quad (108)$$

где:

$A$ — расход воздуха в *м*$^3$*/сек*;
$v_в$ — скорость движения воздуха в *м/сек*.

Магнитные и механические потери мало зависят от нагрузки и могут быть отнесены к постоянным потерям. Они являются потерями холостого хода.

Добавочные потери складываются из потерь в сердечнике якоря вследствие искажения магнитного поля реакцией якоря; потерь в меди обмоток якоря и коллекторе от вихревых токов; потерь, возникающих при коммутации тока, и др. Все эти потери не превышают 1% мощности машины (ГОСТ 183—55).

Все потери в машине равны сумме отдельных потерь:

$$\Sigma P=P_м+P_{ст}+P_{мех}+P_{доб}.$$

Зная потери в машине, всегда можно определить коэффициент полезного действия (к. п. д.) $\eta$ машины.

Как известно, для генераторов к. п. д. представляет собой отношение электрической полезной мощности машины $P_э$ к механической мощности $P_{мех}$ на валу, т. е.

$$\eta_{ген}=\frac{P_э}{P_{мех}}100\,[\%].$$

Для двигателей к. п. д. вычисляется из отношения

$$\eta_{дв}=\frac{P_{мех}}{P_э}100[\%].$$

Электрическая мощность легко определяется при помощи электроизмерительных приборов. Она равна $P_э=UI$. К. п. д. машины может быть определен из отношения:
для генератора

$$\eta_{ген}=\frac{P_э}{P_э+\Sigma P}=\frac{UI}{UI+\Sigma P}, \qquad (109)$$

для двигателя

$$\eta_{дв}=\frac{P_э-\Sigma P}{P_э}=\frac{UI-\Sigma P}{UI}. \qquad (110)$$

Так как к.п.д. машин зависит от суммы потерь, то он не является величиной постоянной, а зависит от нагрузки. При холостом ходе машин, когда полезная мощность равна нулю, к. п. д. также равен нулю. По мере увеличения нагрузки к. п. д. машины быстро увеличивается. Наибольшее значение он имеет при нагрузке, равной 0,8—1,0$P_н$. При значительных перегрузках вследствие увеличения потерь в цепи якоря ($P_a=I_a^2r_a$), к. п. д. снова снижается.

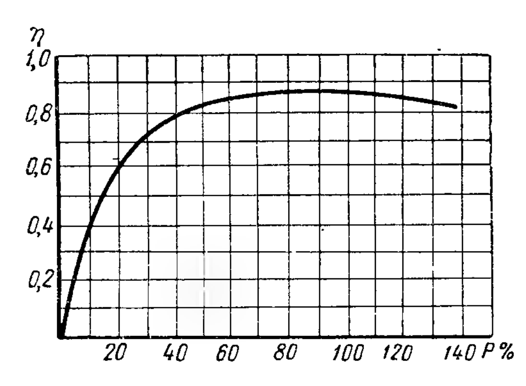



Рис. 88. Кривая к.п.д. двигателя постоянного тока типа ПН-85

К. п. д. электрических машин постоянного тока составляет: для машин малой мощности —75—80%, для машин средней и большой мощности — 85—95%.

На рис. 88 приведен график к п. д. машины постоянного тока типа ПН-85, где на оси абсцисс отложены мощности $P$ в % от $P_н$.

## § 40. ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Пускорегулирующая аппаратура предназначается для пуска в ход электрических машин и регулировки напряжения на зажимах генераторов или скорости вращения и вращающего момента электрических двигателей.

Различают аппаратуру ручного и полуавтоматического или автоматического управления. Кроме того, управление может осу-

ществляться на месте установки электрической машины или дистанционно (на расстоянии).

В схемах ручного, полуавтоматического и автоматического управления широкое применение находят контакторы и реле, являющиеся электромагнитными приборами.

**Контактор.** Контактор — коммутационный прибор, служащий для частых включений и отключений электрических цепей.

Устройство контактора показано на рис. 89. Сердечник вместе с катушкой неподвижно закрепляется на стальном ярме. Последнее с помощью выступающего конца сердечника и гайки монтируется на изоляционной плите.

Якорь контактора свободно вращается на оси. Передний конец якоря шарнирно связан с подвижным главным контактом. Неподвижный главный контакт жестко закрепляется на контактной стойке, смонтированной на плите. Медная шина, присоединенная к неподвижному контакту, имеет несколько витков, которые образуют дугогасительную катушку.

Ток нагрузки, протекающий через эту катушку, создает магнитное поле.

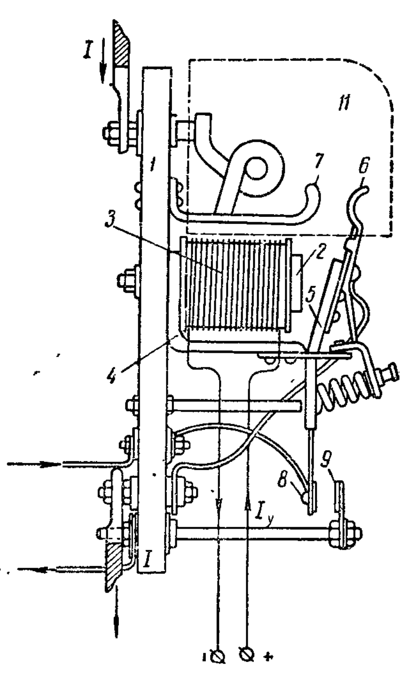



Рис. 89. Контактор постоянного тока:

1—изоляционная плита; 2—сердечник; 3—катушка; 4—ярмо; 5—якорь; 6—подвижный главный контакт; 7—неподвижный главный контакт; 8—подвижный блок-контакт; 9—неподвижный блок-контакт; 10—дугогасительная катушка; 11—дугогасительная камера

Как подвижный, так и неподвижный контакты заключены в особую дугогасительную камеру из изоляционного теплостойкого материала, в которой имеется щель. На рисунке эта камера изображена пунктиром. Создавая магнитное поле, дугогасительная катушка в месте разрыва контактов выталкивает дугу вперед и вверх через щель в камере, в результате чего дуга разрывается и исчезает. Это так называемое «магнитное дутье» постоянно используется при гашении электрической дуги в цепях постоянного тока.

При прохождении электрического тока по катушке контактора сердечник намагничивается и притягивает якорь, вследствие чего происходит замыкание подвижного и неподвижного главных контактов, включающих главную цепь.

По положению главных контактов различают контакторы с нормально-открытыми главными контактами (сокращенно н. о.)

и нормально-закрытыми главными контактами (сокращенно н. з.). Кроме того, контакторы могут быть с дугогашением, т. е. с устройством для магнитного гашения электрической дуги, и без дугогашения.

Контакторы с н. о. главными контактами и дугогашением используются в качестве линейных и реверсирующих контакторов, а также в качестве контакторов ускорения.

Контакторы с н. з. главными контактами применяются для цепей динамического торможения, аварийных переключений в цепи освещения и т. п.

Нередко контакторы имеют, кроме главных контактов, одну или несколько вспомогательных пар контактов, называемых блок-контактами. Эти контакты также могут быть нормально-открытыми или нормально-закрытыми. На рис. 89 показан контактор с нормально-открытыми главными контактами и нормально-открытыми блок-контакта́ми. При замыкании главных контактов одновременно происходит замыкание вспомогательных контактов.

Контакторы переменного тока имеют общий магнитный привод для нескольких силовых контактов, которые при срабатывании контакторов замыкаются одновременно. Контакторы переменного тока изготовляются двух-, трех- и четырехполюсными, в то время как контакторы постоянного тока чаще всего выполняются однополюсными. Главные контакты контакторов переменного тока изготовляются только нормально-открытыми.

**Реле.** В схемах автоматического управления все переключения в цепях управления производятся при помощи специальных приборов, называемых реле. Реле срабатывают без участия обслуживающего персонала под влиянием изменения напряжения, тока или мощности электрической цепи. Они могут реагировать также на изменение обратной э. д. с. в электрических двигателях.

Конструктивно реле устроены так же, как и контакторы, только их контакты включаются не в главные цепи, а в цепи управления (двигателями или другими приемниками электрической энергии).

Реле могут быть с катушками напряжения и с токовыми катушками. Катушки напряжения включаются между двумя проводами цепи, и их работа определяется заданным напряжением на зажимах. Токовая катушка включается последовательно с каким-либо приемником тока, и величина тока, протекающего по ней, определяется током приемника.

По действию в электрических схемах реле подразделяются на реле управления (ускорения) и реле защиты.

Посредством реле управления осуществляется автоматический пуск, остановка, изменение направления вращения, торможение двигателя. Реле управления могут быть: а) мгновенного действия (рис. 90), срабатывающие в течение не более 0,15 сек. и б) с выдержкой времени (рис. 91), срабатывающие в соответствии с установкой времени, на которое отрегулированы реле.

Промежуточные реле, относящиеся к реле управления, предназначаются для сообщения полученного импульса отдельным цепям или для изменения воздействующего на реле импульса.

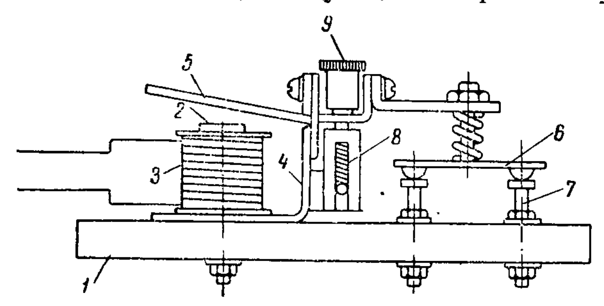



Рис. 90. Электромагнитное реле постоянного тока:
1—изоляционная панель; 2—сердечник; 3—катушка; 4—ярмо; 5—якорь; 6—подвижный главный контакт; 7—неподвижный главный контакт; 8—натяжная пружина; 9—регулировочный винт

Реле времени предназначены для получения заданного интервала времени между моментом получения импульса и моментом срабатывания промежуточного реле. Эти реле широко применяются в схемах электрических приводов судовых механизмов для осуществления пуска электродвигателей в функции времени.

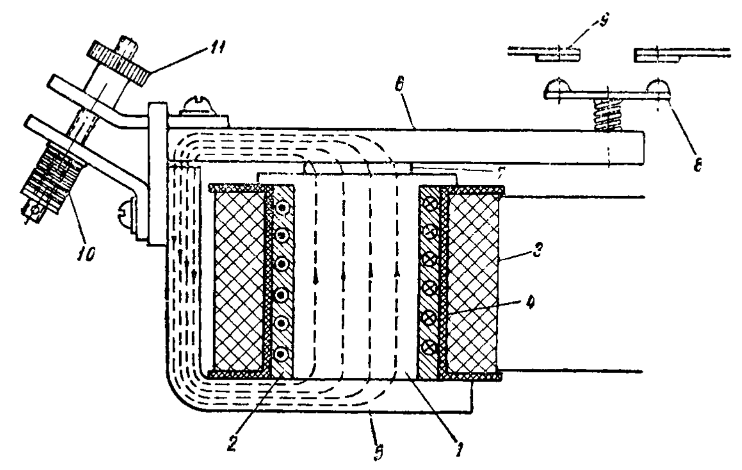


Рис. 91. Электромагнитное реле времени:
1—сердечник; 2—медная гильза; 3—катушка; 4—изоляция; 5—ярмо; 6—якорь; 7—немагнитная прокладка; 8—подвижный контакт; 9—неподвижный контакт; 10—натяжная пружина; 11—регулировочный винт

Выдержка времени в электромагнитных реле обеспечивается за счет того, что на сердечник, помимо основной катушки, насаживается специальная медная гильза. При исчезновении магнитного потока в медной гильзе наводятся токи индукции, которые своими магнитными полями поддерживают убывающее основное поле и

удлиняют период его исчезновения. Чем толще медная гильза, тем больше выдержка времени. Увеличение толщины немагнитной прокладки приводит к уменьшению выдержки времени. Имеются также реле, выдержка времени которых обеспечивается за счет часовых механизмов.

Защитные реле осуществляют различного рода защиту: максимальную, минимальную, нулевую, защиту при исчезновении поля, защиту при обратном токе и т. д.

Реле максимального тока срабатывают при увеличении тока в обмотке реле выше определенного значения (уставки). Они применяются для защиты двигателей от перегрузки или короткого замыкания.

Реле минимального тока срабатывают при уменьшении тока в его обмотке ниже заданного значения (уставки). Они служат в основном для контроля тока в цепях возбуждения.

Реле нулевого тока — минимальное, у которого не оговорен предел уменьшения величины тока. Оно предназначается главным образом для предупреждения обрыва цепи тока.

Реле обратного тока срабатывает при изменении направления тока в его обмотке. Оно применяется для защиты генераторов от перехода в двигательный режим при их параллельной работе.

Пуск электрических двигателей в ход производится при помощи пусковых реостатов, включаемых на время пуска последовательно в цепь якоря двигателя. Непосредственное включение двигателей в сеть недопустимо из-за больших пусковых токов, возникающих в обмотке якоря в начальный момент пуска и превышающих номинальный в 10—25 раз (§ 34).

Согласно Правилам Речного Регистра СССР электрические двигатели постоянного тока, предназначенные для продолжительного режима работы с редкими пусками, мощностью до 0,5 *квт* и скоростью вращения до 2800 об/мин, мощностью до 1,0 *квт* и скоростью вращения до 1500 об/мин и мощностью до 1,5 *квт* и скоростью вращения до 1000 об/мин могут включаться в электрическую сеть непосредственно без пускового реостата. При этом, однако, их статический момент на валу не должен превышать номинального момента движения, а маховой момент привода — махового момента якоря.

Регулирование напряжения на зажимах генераторов и скорости двигателей осуществляется посредством регулировочных реостатов, включаемых последовательно в цепь возбуждения электрических машин. С введением в цепь возбуждения сопротивления (отдельных ступеней реостата) ток возбуждения уменьшается, уменьшается и магнитный поток, в результате чего напряжение на зажимах генератора также уменьшается. Скорость вращения двигателей с уменьшением возбуждения возрастает, так как $n = \frac{E}{k_e \Phi}$.

**Пусковые реостаты.** Пусковые реостаты предназначены для снижения величины пускового тока в момент пуска двигателя.

Расчет пускового реостата производят, исходя из допустимой кратности пускового тока, которая обычно не должна превышать 2—2,5-кратной величины номинального рабочего тока двигателя (см. § 33), по формуле

$$r_p = \frac{U_н}{I_{пуск}} - r_a,$$

где:

$U_н$ — номинальное напряжение в *в*;

$I_{пуск}$ — допустимый пусковой ток в *а*; $I_{пуск} = 2-2{,}5 I_н$;

$r_a$ — омическое сопротивление обмотки якоря двигателя в *ом*.

Пусковые реостаты включаются в цепь якоря двигателя лишь на период его пуска, после чего полностью выводятся из цепи. Оставлять пусковые реостаты под нагрузкой не разрешается, так как они не рассчитаны на длительное прохождение через них рабочего тока.

Пусковые реостаты могут быть жидкостные или металлические. Жидкостные реостаты применяются редко. Металлические пусковые реостаты (рис. 92) состоят из комплекта элементов сопротивлений, встроенных в металлический корпус, и коммутирующего устройства, смонтированного на изоляционной плите.

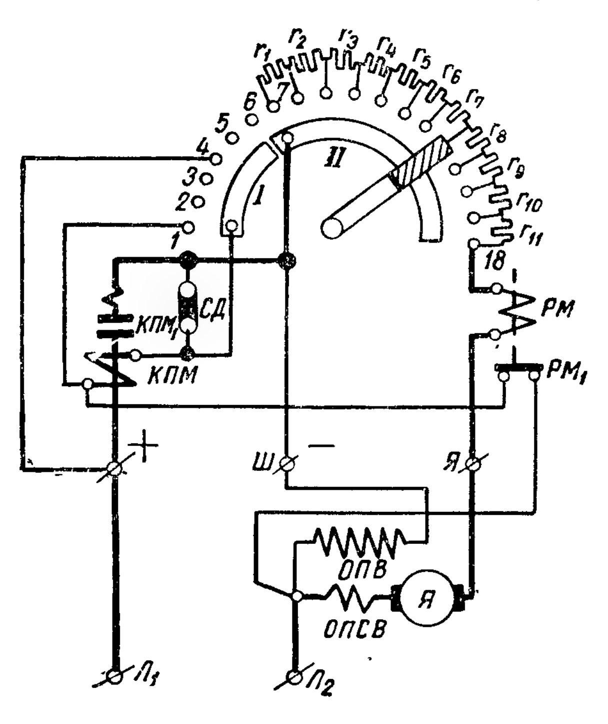



Рис. 92. Пусковой реостат для машин постоянного тока

Коммутирующее устройство состоит из ряда контактов, контактных полос и контактной щетки, скользящей одновременно по контактам и контактным полосам.

Реостаты изготовляются в защитном (тип РП) и брызгонепроницаемом (тип РЗП) исполнении. Они могут иметь воздушное или масляное охлаждение. Реостаты различаются по величине (габаритам), в зависимости от мощности машин, для пуска которых они предназначены.

Пусковые реостаты типов РП и РЗП предназначены для пуска

электрических двигателей постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения при напряжении до 220 *в*.

В зависимости от мощности двигателей различают реостаты четырех величин (габаритов): 1-й величины—0,52—3,7 *квт*; 2-й величины —3,7—7,0 *квт;* 3-й величины —5—15 *квт;* 4-й величины — 13,5—42 *квт*.

Все реостаты имеют минимальную защиту, осуществляемую контакторами КПМ, а реостаты 2—4-й величины, кроме того, снабжены максимальной защитой в виде реле максимального тока мгновенного действия РЭ-70.

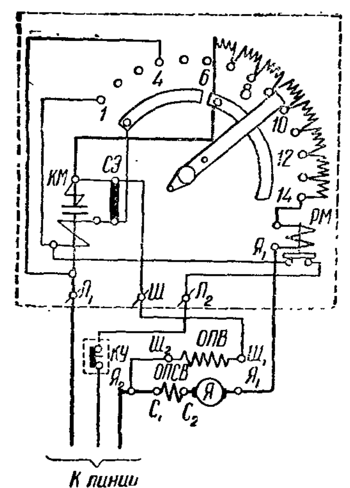



Рис. 93. Схема пускового реостата 3-й величины:

КМ—контактор минимального напряжения; РМ—реле максимального тока; РЭ—сопротивление; Я—обмотка якоря двигателя постоянного тока; ОПВ—обмотка параллельного возбуждения; ОПСВ—обмотка последовательного возбуждения; $Л_1$, Ш, $Л_2$—выводные зажимы реостата; КУ—кнопка управления

Контакторы срабатывают при понижении номинального напряжения сети на 25—50%.

На рис. 93 приводится схема пускового реостата 3-й величины. При установке контактной щетки реостата в рабочее положение (контакт *4*), катушка контактора КПМ получает питание и замыкает свои главные контакты ($КПМ_1$) в цепи якоря машины. Путь тока: $Л_1$ — контакт *4*—контактная щетка — контактная полоса *I* — катушка контактора КПМ—н.з. контакты реле максимального тока РМ—$Л_2$. Контактор остается включенным в течение всего времени работы двигателя.

Контакты *5* и *6* являются холостыми так же, как и контакты *2* и *3*, и служат для предотвращения порывистого включения цепи. Контакт *7* представляет собой первый пусковой контакт. В положении щетки на контакте *7* образуются две цепи: 1) $Л_1$ — контакты контактора $КПМ_1$— контактная полоса *II* — контактная щетка—контакт *7* — пусковые сопротивления $r_1$—$r_{14}$ — катушка реле максимального тока РМ — якорь — ОПСВ — $Я_2$, 2) $Л_1$ — контакты контактора $КПМ_1$ — добавочное сопротивление СД — катушка контактора КПМ — н. з. контакты реле максимального тока $РМ_1$ — $Л_2$. Реле максимального тока РМ рассчитано на превышение рабочего тока над номинальным до 200%. При перегрузках сверх установки реле (свыше 200%) оно срабатывает и размыкает свои контакты $РМ_1$ в цепи катушки контактора. Контактор, лишившись питания, размыкает свои главные контакты в цепи якоря двигателя и тем отключает его от сети.

По окончании процесса пуска двигателя контактная щетка должна быть установлена на последнем контакте *18* с тем, чтобы все

элементы сопротивлений были выведены из цепи. Оставлять щетку в промежуточном положении нельзя. В процессе пуска на каждом контакте необходимо задерживаться 2—3 сек., так как при быстром выведении пусковых сопротивлений двигатель не успеет набрать скорость и ток в якоре может превысить допустимую величину.

При остановке двигателя контактная щетка быстро переводится в крайнее левое положение на контакт *1*. Если остановка двигателя производится с помощью пусковой кнопки, то включать двигатель до перевода рукоятки реостата на контакт *1* строго запрещается.

Добавочное сопротивление СД имеет две функции. Когда контактная щетка находится на контактной полосе *II*, катушка контактора КПМ присоединена к зажимам $Л_1$ и $Л_2$ не непосредственно, а через сопротивление СД, которое ограничивает величину тока, проходящего через катушку.

При остановке двигателя контактная щетка находится на контакте *1*. В этот момент сопротивление СД играет роль разрядного сопротивления обмотки возбуждения двигателя. Если разомкнуть цепь обмотки возбуждения, в ней появится э. д. с. самоиндукции, которая будет стремиться поддержать существовавший до этого ток возбуждения как по величине, так и по направлению. В результате на зажимах обмотки и между ее витками может возникнуть слишком высокое напряжение, опасное для изоляции обмотки. Но при положении контактной щетки на контакте *1* обмотка возбуждения окажется замкнутой на себя через сопротивление СД, вследствие чего напряжение на ней не сможет возрасти до опасной величины.

**Пускорегулирующие реостаты.** Число оборотов двигателей чаще всего регулируется изменением величины магнитного потока $n=\frac{E}{k_e\Phi}$. Для этого в цепь возбуждения двигателя включается регулировочный реостат (регулятор возбуждения), при помощи которого изменяют величину тока возбуждения и тем самым магнитный поток машины ($\Phi=kI_в$). С введением реостата в цепь возбуждения ток возбуждения, а следовательно, и магнитный поток, уменьшается. Число оборотов при этом увеличивается.

С целью упрощения аппаратуры пусковые и регулирующие реостаты выполняются в виде единого прибора — пускорегулирующего реостата.

Посредством пускорегулирующего реостата типа РЗР, кроме пуска и регулировки числа оборотов двигателя, осуществляется также минимальная защита контактором КПМ и максимальная защита с помощью реле РЭ-70. Действие контактора и реле такое же, как и в пусковых реостатах.

Пускорегулирующий реостат, схема которого дана на рис. 94, состоит из двух зон: пусковой (*7—13*), элементы сопротивлений которой включаются только на период пуска и в процессе пуска

последовательно выключаются один за другим, и регулировочной (*14—28*).

При регулировке числа оборотов двигателя контактную щетку перемещают вправо от крайнего пускового положения (*14*) и тем самым вводят в цепь возбуждения элементы сопротивления регулировочного реостата.

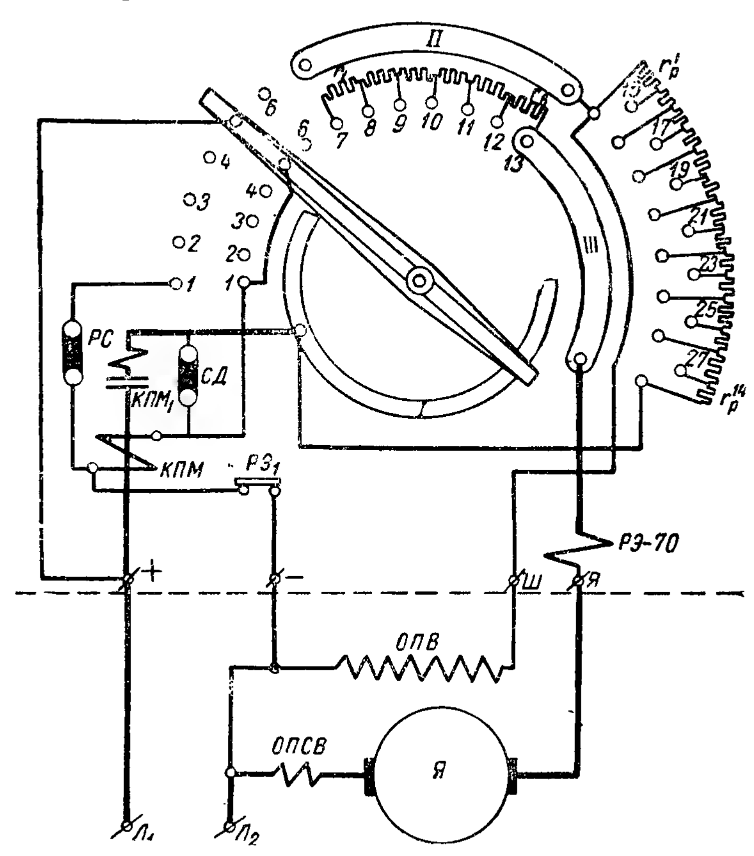



Рис. 94. Схема пускорегулирующего реостата РЗР

Рассмотрим процесс пуска и управления двигателем со смешанным возбуждением при помощи пускорегулирующего реостата (см. рис. 94).

Пусковые сопротивления подключены к контактам *7-13*. Постепенным переводом контактной щетки по этим контактам выводят ступенями пусковые сопротивления. При пуске двигателя его обмотка возбуждения все время находится под полным напряжением сети через контактную полосу *II*, и магнитный поток имеет свое наибольшее значение. Когда двигатель разовьет номинальное число оборотов, можно регулировать его поток возбуждения и изменять скорость вращения двигателя путем передвижения контакт-

ной щетки по контактам *14—28*. При этом к щеткам двигателя все время будет приложено постоянное напряжение сети через контактную полосу *III*. Когда реостат выключен, его контактная щетка должна находиться на контакте *1*, при этом катушка контактора КПМ замкнута на разрядное сопротивление РС. Контакты *2, 3, 4*—холостые. Контактная пара *5* является первым рабочим положением реостата. В этом положении происходит включение катушки контактора КПМ в сеть, в результате чего замыкаются н. о. главные контакты контактора. Путь тока: $Л_1$ — контакты *5* — контактная щетка — катушка контактора КПМ — н. з. контакты реле максимального тока $РЭ_1$ — $Л_2$.

Контакты *6* так же, как и контакты *2, 3, 4* — холостые. В положении контактной щетки на контакте *7* происходит включение в сеть главной цепи якоря двигателя и цепей его обмоток возбуждения ОПСВ и ОПВ. При этом образуются следующие цепи: 1) $Л_1$— контакты контактора $КПМ_1$—контактная полоса *I*— контактная щетка — контакт *7* — пусковые сопротивления $r_1$—$r_6$ — контактная полоса *II*—катушка реле максимального реле РЭ-70—якорь—ОПСВ—$Л_2$;

2) $Л_1$ — контакт контактора $КПМ_1$ — добавочное сопротивление СД — катушка контактора КПМ — контакты реле максимального тока $РЭ_1$ — $Л_2$.

При переводе контактной щетки по контактам *8—13* постепенно выключаются отдельные ступени пускового сопротивления. На контакте *13* все пусковые сопротивления будут выведены и двигатель разовьет номинальное число оборотов, при дальнейшем перемещении контактной щетки по контактам *14—28* в цепь обмотки параллельного возбуждения ОПВ будут вводиться секции сопротивления регулировочного реостата $r_p^1$—$r_p^{14}$.

Уменьшение магнитного потока приводит к увеличению числа оборотов. Путь тока при положении контактной щетки на контакте *15* будет:

1) $Л_1$ — главные контакты контактора $КПМ_1$ — контактная полоса *I* — контактная щетка — контактная полоса *III* — катушка реле максимального тока РЭ — якорь электродвигателя — обмотка последовательного возбуждения ОПСВ — $Л_2$;

2) $Л_1$ — главные контакты контактора $КПМ_1$ — контактная полоса *I* — контактная щетка — контакт *15* — первая ступень регулировочного сопротивления $r'_p$ — контакт *14* — обмотка параллельного возбуждения ОПВ — $Л_2$;

3) $Л_1$ — главные контакты контактора $КПМ_1$ — добавочное сопротивление СД — катушка контактора КПМ — контакты реле максимального тока $РЭ_1$—$Л_2$.

В этом положении сопротивление СД ограничивает ток, текущий через катушку контактора КПМ, а сопротивление РС является разрядным сопротивлением для обмотки возбуждения двигателя.

Пускорегулирующие реостаты изготовляются в брызгонепроницаемом исполнении трех величин (габаритов) в зависимости от

мощности двигателей: 2-й величины 2—3 *квт;* 3-й величины 3—12 *квт*; 4-й величины 12—24 *квт.*

**Реостаты возбуждения.** Для регулирования напряжения генераторов, а также и числа оборотов двигателей постоянного тока применяются реостаты (регуляторы) возбуждения, включаемые последовательно в цепь возбуждения машин. Реостаты возбуждения поставляются комплектно с электрической машиной. Расчет их обычно производится либо аналитическим путем, исходя из пределов регулирования напряжения или скорости вращения двигателя с учетом минимально допустимой величины магнитного потока, либо графическим путем по регулировочной характеристике машины (см. § 34).

Наиболее распространенными сериями этих реостатов являются: серия РВ — в защищенном исполнении и РЗВ — в брызгонепроницаемом исполнении. Для ручного регулирования возбуждения возбудителей синхронных генераторов, электрических двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и генераторов постоянного тока применяются регуляторы серии Р открытого исполнения.

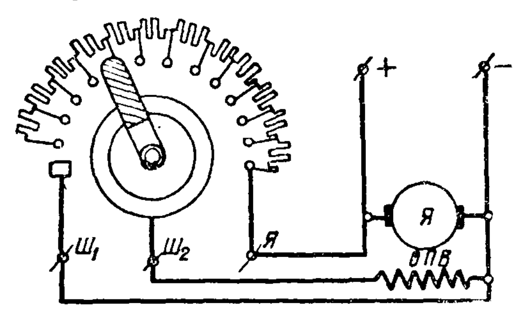


Рис. 95. Схема реостата возбуждения серии РЗВ

Реостаты возбуждения различаются по исполнению (защищенное и брызгонепроницаемое), по величине (в зависимости от объемной мощности), по способу управления (ручное и ручное с возможностью дистанционного управления), по схемам включения (в зависимости от назначения).

Одна из схем реостата возбуждения серии РЗВ приведена на рис. 95.

Реостаты возбуждения состоят из элементов сопротивлений и коммутирующего устройства. Элементы сопротивлений выполняются в виде фарфоровых цилиндров или штампованных из низкосортной стали пластин с фарфоровыми изоляторами, на которые намотана высокоомная проволока (константановая проволока диаметром 0,5—2 *мм*).

**Ящики сопротивлений.** Реостаты со встроенными сопротивлениями применяются для управления двигателями малой мощности. Для двигателей большой мощности такие реостаты оказываются чрезмерно громоздкими и нуждаются в специальных устройствах для их охлаждения. Поэтому при управлении двигателями значительной мощности, а также при осуществлении управления двигателями по контроллерным и контакторным системам приме-

няют комплекты элементов сопротивления — ящики сопротивлений серий ЯС, СН и др. Такие комплекты обычно изготовляются из различных сплавов металлов и обладают высоким удельным сопротивлением. Наиболее распространенными элементами сопротивлений являются элементы из медноникелевых сплавов (константан, реотан и никелин), хромоникелевых сплавов (нихром), чугунные и штампованные из электротехнической стали. Эти элементы допускают нагрев до 200—500° С.

Элементы сопротивлений изготовляются обычно в виде лент, спиралей или пластин.

Они собираются в специальных металлических ящиках, имеющих доступ воздуха для охлаждения. Между собой элементы соединяются гибкими соединительными проводами.

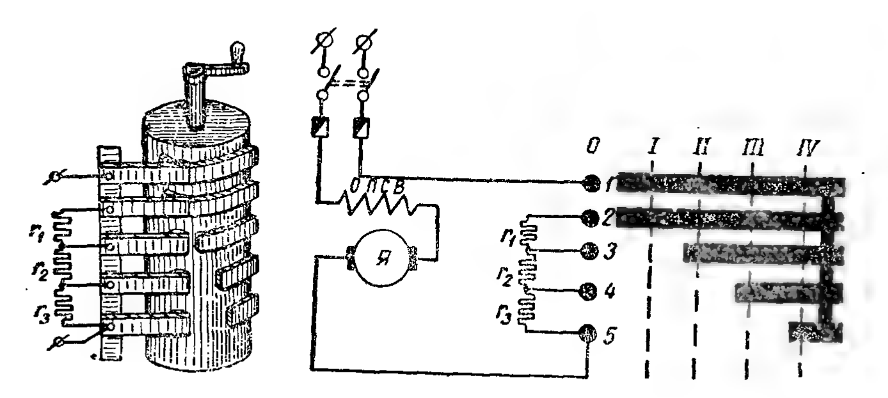



Рис. 96. Пуск электрического двигателя при помощи барабанного контроллера

Ввод отдельных элементов в цепь и вывод их из цепи осуществляется при ручном управлении при помощи контроллеров, а при полуавтоматическом и автоматическом управлении—посредством контакторов и реле.

**Контроллер.** Контроллер является прибором для ручного управления. С его помощью поворотом рукоятки или штурвала и установкой их в определенных фиксированных положениях можно производить различные переключения в электрических схемах.

При помощи контроллера можно осуществлять пуск двигателя, регулировать его число оборотов, изменять направление вращения, тормозить и останавливать двигатели. С помощью контроллера осуществляется управление как двигателями постоянного тока, так и асинхронными двигателями переменного тока.

По конструкции различают два типа контроллеров — барабанные и кулачковые.

Основной частью контроллера барабанного типа (рис. 96) является поворотный валик-барабан, изготовленный из изоляционного материала. Этот барабан вращается посредством ручки или

штурвала. На внешней цилиндрической поверхности барабана прикреплены медные кольцевые сегменты разной длины, расположенные в определенном порядке и соединенные между собой в различной последовательности, в зависимости от электрической схемы.

Контактное устройство барабанных контроллеров состоит из ряда контактных пальцев, укрепленных на рейке. Отдельные пальцы размещены против соответствующих сегментов и могут давать при соприкосновении с ними электрическое соединение (контакт).

При повороте барабана на тот или иной угол контактные пальцы и соответствующие им сегменты соприкасаются друг с другом, в результате чего происходит замыкание различных цепей электрической схемы.

Кулачковые контроллеры так же, как и барабанные, позволяют производить различные сложные переключения в схемах управления двигателями: их преимуществом является более четкая и надежная работа при значительно большей частоте включений. Кулачковый контроллер состоит из комплекта контактных элементов, размыкаемых и замыкаемых при помощи кулачковых шайб, расположенных на поворотном валу контроллера. Набегая при повороте вала на ролики соответствующих контактных элементов, они отклоняют эти элементы в сторону и тем разрывают цепь.

При размыкании контактов между ними образуется электрическая дуга, вызывающая сильное обгорание контактов. Для гашения дуги контроллеры снабжаются специальным дугогасящим устройством.

На рис. 96 дана простейшая схема пуска двигателя с последовательным возбуждением при помощи барабанного контроллера. На этой схеме контактные сегменты контроллера показаны в виде широких черных полос (развертки сегментов), а контактные пальцы — в виде черных кружков.

Фиксированные положения барабана контроллера при его повороте отмечены пунктирными вертикальными линиями, снабженными номерами — римскими цифрами.

В нейтральном положении О контактные сегменты и контактные пальцы между собой разъединены, и контакт между ними отсутствует. При повороте рукоятки на некоторый угол барабан контроллера займет фиксированное положение *I* и произойдет замыкание контактного пальца *1* с сегментом *1* и контактного пальца *2* с сегментом *2*. Так как все сегменты связаны между собой соединительной шинкой, то образуется замкнутая электрическая цепь: сеть—нож рубильника—предохранитель—контактный палец *1*—сегмент *1* — сегмент *2* — контактный палец *2* — $r_1$—$r_2$—$r_3$—якорь двигателя — обмотка последовательного возбуждения—предохранитель—нож рубильника—сеть. Двигатель включен в сеть и начнет развивать обороты.

При повороте барабана (в фиксированное положение II) произойдет замыкание контактного пальца *3* с сегментом *3*. Так как

сегменты 2 и 3 электрически соединены друг с другом, сопротивление $r_1$ окажется закороченным. Электрический ток, минуя сопротивление $r_1$, пойдет по соединительной шинке между сегментами 1-2-3 через контактный палец 3, сопротивления $r_1$ и $r_2$, якорь двигателя и его обмотку возбуждения в сеть.

В фиксированном положении III, кроме сопротивления $r_1$, окажется закороченным также сопротивление $r_2$, а в положении IV будут закорочены все три сопротивления, и двигатель, вращаясь с номинальной скоростью, будет включен на полное напряжение сети.

В отношении управления электрическими двигателями судовых механизмов Правилами Речного Регистра СССР установлен ряд общих положений. В электрических приводах судовых электрических установок применяются реостатная, контроллерная, контакторная, двигатель-генераторная системы управления. Независимо от принятой системы управления в тех случаях, когда пусковая аппаратура удалена от места установки электрического двигателя, в непосредственной близости от него должно иметься особое устройство, позволяющее в случае необходимости немедленно отключить двигатель от сети.

Аппаратура управления должна устанавливаться так, чтобы были обеспечены свободный доступ к ней и удобное управление ею. Пускорегулирующая аппаратура подъемно-транспортных устройств (лебедки, краны, нории и пр.) должна быть сконструирована таким образом, чтобы поворот рукоятки управления вправо (вверх или на себя в зависимости от устройства прибора) соответствовал подъему груза вверх, а ее поворот влево (вниз или от себя) — опусканию груза.

Электроприводы судовых палубных механизмов (руль, брашпиль, шпиль, лебедки и пр.) должны иметь максимальную или тепловую защиту. Защита электродвигателей всех других приводов от чрезмерных перегрузок должна осуществляться максимальными автоматами или предохранителями.

Все электродвигатели должны иметь нулевую защиту за исключением двигателей, пуск которых осуществляется без пускового реостата непосредственным включением в сеть.

В схемах управления электроприводами кранов и лебедок должна быть предусмотрена защита: от перегрузок — с помощью грузовых реле, от сверхтоков—с помощью максимальных реле мгновенного действия, от чрезмерного понижения напряжения или исчезновения напряжения — с помощью контакторов и пр.

## § 41. ЭКСПЛУАТАЦИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Под обслуживанием электрических машин понимают все действия, связанные с подготовкой машин к их пуску, пуск, наблюдение за их работой и остановку машин.

В процессе подготовки машин к пуску проверяют путем внешнего осмотра их исправность, нет ли вблизи посторонних предме-

тов, которые могут попасть в машину при ее работе, чистоту всей машины, обращая особенное внимание на чистоту коллектора, проверяют наличие щеток в щеткодержателях и плотность прилегания их к коллектору, правильное положение траверсы, наличие и достаточность масла в подшипниках.

Кроме того, обязательно следует проверить положение рукояток и штурвалов реостатов и контроллеров, которые должны находиться в начальном пусковом положении, когда реостаты и пусковые сопротивления полностью введены в цепь.

Необходимо также проверить отсутствие посторонних предметов, которые могут попасть внутрь машины при ее пуске.

Пуск в ход генераторов и двигателей постоянного тока осуществляется в последовательности, описанной в § 28 и 33.

После пуска первичного двигателя и сообщения ему номинального числа оборотов возбуждают генератор до номинального напряжения на его зажимах. После этого генератор включают на шины, постепенно нагружая его и одновременно регулируя напряжение.

Пуск двигателей осуществляется включением рубильника или пакетного выключателя с последующим постепенным плавным выведением реостата из цепи якоря.

В процессе работы машин постоянного тока следует наблюдать за наличием масла в подшипниках, нагревом отдельных частей машины (на ощупь), отсутствием посторонних шумов в подшипниках, работой коллектора и щеток. У генераторов не реже одного раза за смену надо проверять по вольтметру сопротивление изоляции обмоток.

Все обнаруженные неполадки в работе машин следует по возможности немедленно устранять.

Если неполадки на месте устранены быть не могут, машину необходимо остановить и заменить новой. Допускать работу неисправной машины можно лишь в аварийных случаях, но при этом о ее неисправности должно быть сообщено старшему по смене, на судах — старшему электрику, а где их нет — главному механику.

Во время работы генераторов возможны случаи отключения их автоматическими выключателями, например, при перегрузке.

Так как такие отключения возможны, то следует произвести опытное повторное включение. Если генератор тут же вновь будет отключен, то нужно выяснить причины срабатывания автомата и ни в коем случае не включать генератор вновь или помимо автоматического выключателя до устранения неполадки. Для этого надо отключить все фидеры от шин распределительного щита и, если генератор без нагрузки работает нормально, постепенно подключать один фидер за другим до обнаружения дефектного.

Остановку электрических генераторов следует производить в порядке, обратном пуску: снять нагрузку с генератора, отключить разгруженный генератор от шин станции, снять возбуждение,

остановить первичный двигатель, после остановки генератора осмотреть и очистить его.

Отключение двигателя производить путем выключения рубильника или пакетного выключателя, после чего рукоятку пускового реостата надо поставить в начальное пусковое положение, подготовляя тем самым схему к последующему пуску.

В процессе работы генераторов, особенно при параллельной работе, возможно размагничивание генераторов, потеря ими остаточной индукции. Подмагничивание генераторов производится от независимого источника постоянного тока (аккумуляторов). Для этого концы обмотки возбуждения отсоединяют от обмотки якоря и подключают на 2—3 мин. к зажимам источника тока. При этом надо следить за правильным подключением полюсов источника тока к концам обмотки возбуждения, обеспечив соответствие полярности обмотки возбуждения и зажимов источника тока.

Операции по уходу за электрическими машинами включают в себя все действия обслуживающего персонала, направленные на поддержание машин в исправном состоянии, как-то: чистка и промывка машин, уход за коллектором и щеточным механизмом машины, уход за подшипниками.

Чистка электрических машин заключается в продувке их сухим сжатым воздухом под давлением не выше 2 *ат* и обтирке доступных поверхностей обмоток якоря и полюсных катушек сухой тряпкой или тряпкой, смоченной в бензине. У мелких машин при их чистке можно вынуть якорь.

Наиболее ответственной частью машин постоянного тока является коллектор, требующий к себе наибольшего внимания.

Коллектор должен содержаться в особой чистоте. Он должен иметь гладкую, полированную, строго цилиндрическую поверхность. Миканитовые прокладки, разделяющие коллекторные пластины, не должны выступать над поверхностью коллектора.

При всякой остановке машины или работе ее на холостом ходу следует осторожно протереть коллектор сухой полотняной тряпкой. При обнаружении на поверхности коллектора шероховатостей или нагара ее нужно шлифовать стеклянной бумагой № 00. При шлифовке бумагу укрепляют на специальной колодке, вогнутость рабочей поверхности которой совпадает с выпуклостью коллектора.

Удаление выступающих над поверхностью коллектора миканитовых прокладок производится специальным скребком. Эта операция называется продороживанием коллектора. Более серьезные повреждения коллектора устраняются уже в мастерской.

Большое значение для сохранения коллектора имеет подбор, расположение, состояние и установка щеток в щеткодержателях. Щетка должна быть хорошо пришлифована к поверхности коллектора и всей своей контактной поверхностью она должна плотно прилегать к коллектору. Контактная поверхность щеток не должна иметь изъянов, материал щеток должен соответствовать марке ме-

ди, из которой выполнены коллекторные пластины, и электрическим и скоростным характеристикам машины. Давление щеток на коллектор должно быть строго определенным, оно должно находиться в пределах 150—320 *г/см²*. Щетки должны свободно перемещаться в обойме щеткодержателя (зазор на сторону от 0,1 до 0,4 *мм* в зависимости от размеров щетки).

Во избежание неравномерного изнашивания коллектора щетки устанавливаются в шахматном порядке.

Уход за подшипниками сводится в основном к содержанию их в чистоте и своевременной доливке масла. Исправность подшипников определяется обычно по их нагреву и отсутствию посторонних шумов. У подшипников с кольцевой смазкой надо следить за свободной подвижностью, без заедания и касания стенок корпуса подшипника смазочного кольца.

Ниже приводятся наиболее часто встречающиеся неисправности в работе машин постоянного тока.

**Искрение под щетками.** Причинами этой неисправности могут быть: неправильная установка траверсы, неодинаковое расстояние между щетками отдельных пальцев траверсы по окружности коллектора, недостаточное или чрезмерное давление щеток на коллектор, неправильно выбранная марка щеток, дрожание щеточного механизма.

Если искрение под щетками более нормального (см. табл. 4 стр. 72) машина должна быть остановлена. При этом следует проверить состояние поверхности коллектора, исправность щеток и их соответствие данному коллектору, давление щеток и состояние щеточного механизма.

Все замеченные неполадки должны быть устранены и лишь после этого можно пустить машину.

**Нагрев коллектора.** Нагрев коллектора возможен при чрезмерном искрении под щетками, неправильном выборе марки щетки, чрезмерном их давлении на коллектор, слишком большой плотности тока под щетками.

Для того, чтобы коллектор не нагревался, необходимо устранить причины сильного искрения под щетками, проверить давление щеток и, если нужно, понизить его, заменить щетки более мягкими.

Температура коллектора проверяется термометром, причем шарик термометра обертывается тонкой фольгой и после этого прижимается к поверхности коллектора. Замер температуры производится быстро, сразу же после остановки машины.

**Генератор не дает номинального напряжения.** Генератор может плохо возбуждаться вследствие частичного замыкания между отдельными коллекторными пластинами или замыкания между петушками пластин, возможно также междувитковое соединение между отдельными секциями обмотки якоря.

В зависимости от той или иной причины неисправности следует прошлифовать коллектор и прочистить канавки между пласти-

нами, устранить замыкание между петушками или заменить неисправный якорь.

Если генератор вообще не возбуждается или дает пониженное напряжение, то причинами этого могут быть неправильное положение щеток (установлены в обратную сторону), неправильное соединение обмотки параллельного возбуждения с обмоткой якоря, вследствие чего э. д. с. самовозбуждения машины противоположна действию э. д. с. остаточного магнетизма, обрыв или плохой контакт в цепи возбуждения, короткое замыкание в обмотке якоря или на коллекторе, обрыв или плохой контакт в обмотке якоря. Устранение неисправностей вытекает из характера самой неисправности.

Если генератор при нагрузке дает повышенное напряжение, надо проверить, нет ли соединения с корпусом в реостате возбуждения или заземления в проводе, соединяющем реостат возбуждения с генератором. Следует найти место замыкания и устранить его.

**Электродвигатель не работает.** Если двигатель вообще не вращается и при включенном пусковом реостате в цепи двигателя нет тока, а напряжение в цепи есть, то это означает, что имеется обрыв либо в пусковом реостате, либо в обмотке якоря.

Если двигатель при нормальном напряжении работает с недостаточным числом оборотов, то причиной этого может быть неправильное включение регулировочного реостата в цепь возбуждения. Например, если регулировочный реостат включен после пускового реостата, тогда при пуске напряжение возбуждения будет меньше номинального и двигатель не будет давать полного числа оборотов, потребляя из сети ток, более нормального. Кроме того, число оборотов электрического двигателя будет меньше номинального и в том случае, если щетки сдвинуты с нейтрали по направлению его вращения, а также, если имеется междувитковое соединение, короткое замыкание или заземление в обмотке якоря.

Во всех случаях неисправности якоря он должен быть заменен новым.

## *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. Что называется обратимостью электрических машин постоянного тока?
2. В чем заключается закон равновесия моментов?
3. Как производится регулировка числа оборотов у двигателей постоянного тока?
4. Что понимается под плавностью регулировки числа оборотов?
5. Каковы недостатки способа регулировки числа оборотов двигателя введением в цепь якоря дополнительного сопротивления?
6. Как осуществляется пуск двигателя постоянного тока?
7. Как определить величину сопротивления пускового реостата?
8. Какие рабочие характеристики определяют работу двигателя и какие зависимости они отражают?
9. Какая характеристика называется жесткой?
10. Какими свойствами обладают двигатели с параллельным возбуждением? Какая у них механическая характеристика?
11. Как производится регулировка числа оборотов двигателя с параллельным возбуждением?

12. Как определяется графически по регулировочной характеристике сопротивление секции реостата?

13. Каковы свойства электрического двигателя с последовательным возбуждением?

14. Какова характеристика двигателей с последовательным возбуждением?

15. Как производится пуск двигателя с последовательным возбуждением?

16. Чем определяются свойства двигателей со смешанным возбуждением?

17. Какие системы торможения применяются в схемах электрических приводов?

18. В чем сущность электродинамического торможения?

19. Какие потери имеются в электрических двигателях и как они определяются?

20. Чему равен к.п.д. электродвигателя постоянного тока?

21. Каково назначение и как устроены пусковые реостаты?

22. Как устроены пускорегулирующие реостаты?

23. Как производится пуск и регулировка числа оборотов электрического двигателя при помощи пускорегулирующего реостата (разберите схему)?

24. Как устроен и работает контроллер?

25. Какие данные необходимы для расчета электрической машины постоянного тока?

26. Каков порядок расчета электрической машины постоянного тока?

27. Какова допустимая плотность тока для обмотки якоря?

28. Как определяется суммарная м.д.с. машины?

29. Как определяется м.д.с. воздушного зазора?

30. Какая разница между кривой холостого хода и кривой намагничивания машины постоянного тока?

31. Как производится пуск и остановка электрических генераторов постоянного тока?

32. Как производится намагничивание генераторов?

33. Что понимается под обслуживанием электрических машин?

34. Как производится чистка электрических машин?

35. Какие требования предъявляются к коллектору и как осуществляется уход за ним?

36. Как осуществляется уход за щетками и щеточным механизмом?

37. В чем заключается уход за подшипниками?

38. Каковы основные возможные неисправности в работе генераторов постоянного тока и как они устраняются?

39. Какие могут быть причины того, что двигатель не дает номинальных оборотов под нагрузкой?

---

*Раздел второй*

# МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Глава VI*

## СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### § 42. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИНХРОННЫХ МАШИНАХ

Синхронной называется такая электрическая машина переменного тока, скорость вращения которой и частота вырабатываемого ею переменного тока связаны между собой отношением:

$$f=\frac{pn}{60},$$

откуда:

$$n=\frac{60f}{p}, \qquad (111)$$

где:

$n$ — число оборотов вала в минуту;

$f$ — частота переменного тока в пер/сек;

$p$ — число пар полюсов.

Обмотка возбуждения синхронных машин питается постоянным током от особых источников тока.

Синхронные машины обратимы (как и всякие другие электрические машины), т. е. могут работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. Наибольшее распространение эти машины получили в качестве генераторов.

Неподвижная часть машины называется **статором**, а вращающаяся **ротором**.

Синхронные машины чаще всего изготовляются с неподвижной рабочей обмоткой переменного тока и вращающейся обмоткой возбуждения.

При неподвижной рабочей обмотке увеличивается надежность изоляции машины и упрощается соединение машины с внешней сетью. Обмотка возбуждения в данном случае соединяется с источником постоянного тока посредством двух контактных колец и щеток, прилегающих к ним. Чаще всего таким источником является генератор постоянного тока, называемый **возбудителем**.

Генераторы малой мощности выполняются, как и машины постоянного тока, с неподвижными полюсами и вращающейся рабочей обмоткой. Последняя соединяется с сетью при помощи трех контактных колец (по числу фаз) и щеток.

Независимо от того, вращаются ли полюсы магнитной системы машины, а рабочая обмотка неподвижна или, наоборот, вращается рабочая обмотка, а полюсы неподвижны, магнитный поток полюсов и в том и другом случаях пересекает проводники рабочей обмотки и наводит в них э. д. с. по закону электромагнитной индукции Фарадея-Ленца.

Полный период наведенной в проводнике статора э. д. с. равен времени прохождения мимо данного проводника двух соседних полюсов $N$ и $S$. При замкнутой цепи статора по его обмотке проходит переменный ток, который создает свое переменное магнитное поле. В трехфазной обмотке число полюсов создаваемого ею магнитного поля всегда равно числу полюсов магнитной системы машины. Переменное магнитное поле обмотки статора строго следует за изменением э. д. с. в проводниках и чередованием фаз, перемещаясь в направлении вращения магнитной системы машины. Такое переменное поле называется вращающимся магнитным полем[1]. Скорость вращения этого поля равна

$$n_1=\frac{60f}{p}\ [\text{об/мин}].$$

Оба поля (вращающееся магнитное поле и поле ротора) складываются, образуя общее результирующее поле, вращающееся со скоростью $n_2$, равной скорости вращения магнитной системы, т. е. $n_1=n_2$.

Таким образом, скорость вращающегося магнитного поля обмотки статора равна механической скорости вращения полюсов машины или, как говорят, оно вращается синхронно со скоростью основного магнитного поля, откуда и получили свое название синхронные машины переменного тока.

Число полюсов синхронной машины определяется требуемой частотой переменного тока и заданным числом оборотов машины.

В СССР за стандартную частоту принята частота 50 пер/сек. Тогда число пар полюсов будет равно

$$p=\frac{60f}{n}=\frac{60\cdot 50}{n}=\frac{3000}{n}.$$

Число оборотов синхронного генератора зависит от числа оборотов первичного двигателя.

Для получения трехфазного переменного тока в двухполюсной машине, на окружности статора располагают три однофазные об-

---

[1] Более подробно об образовании вращающегося магнитного поля сказано в § 67.

мотки, сдвинутые по фазе относительно друг друга на одну треть двойного полюсного деления, т. е. на $2/3\tau$ или на 120°.

В каждой такой обмотке будут наводиться э. д. с., также сдвинутые по фазе на 120° (рис. 97).

На векторной диаграмме длина каждого вектора равна максимальному значению э.д.с. в обмотке. При вращении векторов (векторная звезда) получаются соответственные синусоиды мгновенных значений э. д. с.

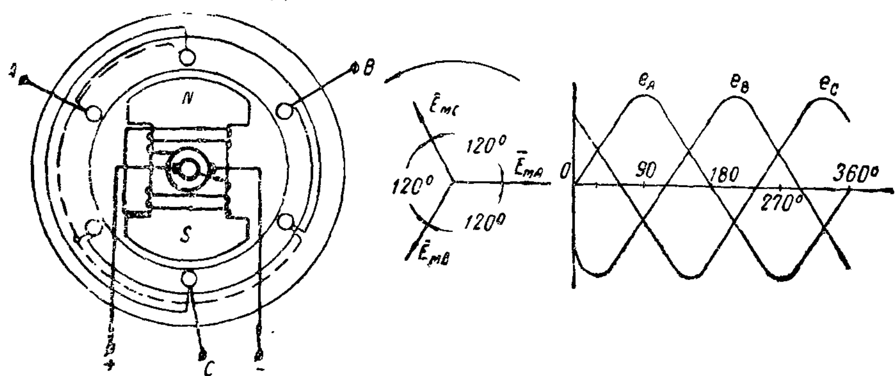



Рис. 97. Схема расположения обмоток трехфазного тока и диаграмма э.д.с.

Обмотки трех фаз обычно соединяют в звезду. При этом фазное напряжение будет в $\sqrt{3}$ раза меньше линейного напряжения сети, что важно в отношении изготовления изоляции обмоток, тем более, что синхронные генераторы в большинстве случаев имеют высокое напряжение (до 35 *кв* и выше).

На современных электрических станциях в качестве первичных двигателей в основном используются паровые и гидравлические турбины. Скорость гидравлических турбин сравнительно невелика, она составляет 60—100 об/мин. Для горных гидроэлектростанций она достигает 500 об/мин. Поэтому генераторы для гидроэлектростанций делаются многополюсными.

Так, например, скорость гидрогенераторов Куйбышевской ГЭС мощностью каждый по 105 тыс. *квт* составляет 68,2 оборота в минуту. Следовательно, генераторы имеют

$$p=\frac{3000}{68,2}=44 \text{ пары полюсов, т. е. 88 полюсов.}$$

В противоположность гидротурбинам паровые турбины выполняются на большое число оборотов—1500—3000 в минуту. Генераторы, предназначенные для соединения с паровыми турбинами, имеют малое число полюсов, при 3000 об/мин — всего одну пару полюсов.

На судовых электростанциях в качестве первичных двигателей используются двигатели внутреннего сгорания — дизели и паро-

вые турбины. Дизель-генераторы развивают до 1500 об/мин. Соединенные с ними генераторы имеют две пары полюсов.

Многополюсные синхронные машины выполняются с явно выраженными полюсами. Каждый полюс такой машины имеет сердечник с полюсным наконечником и катушку возбуждения. Для быстроходных машин большой мощности с числом оборотов 1000 и более устройство явно выраженных полюсов невозможно из-за больших центробежных сил, возникающих в полюсах. Уравновешивание этих сил оказывается очень сложной задачей.

Роторы таких машин делают с неявно выраженными полюсами. Такой ротор представляет собой массивный вал с цилиндрической поверхностью, на которой в пазах заложена обмотка возбуждения.

За последние пятилетки тяжелое электромашиностроение получило в нашей стране особенно широкое развитие. Грандиозные задачи по освоению гидроэнергетических ресурсов рек требуют создания гидрогенераторов мощностью 200—300 тыс. *квт* с высокими технико-экономическими показателями. Это тем более необходимо, что с увеличением мощности и скорости вращения агрегатов сокращаются удельные расходы стали, меди, изоляционных и других материалов. Так, удельный расход материалов для гидрогенераторов Братской ГЭС мощностью 200 тыс. *квт* с числом оборотов 125 в минуту почти вдвое меньше, чем для гидрогенераторов Куйбышевской ГЭС мощностью по 105 тыс. *квт* с числом оборотов 68,2 в минуту, где общий вес каждого генератора составляет 1600 *т*.

## § 43. УСТРОЙСТВО СИНХРОННЫХ МАШИН

Статор машины состоит из литого чугунного или сварного стального корпуса с встроенным в него сердечником, в пазы которого закладывается обмотка.

Сердечник является частью магнитной цепи, по которой замыкается магнитный поток полюсов. Для уменьшения потерь от вихревых токов сердечник делается сборным из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5—1,0 *мм*, изолированных друг от друга бумагой или лаком. При изготовлении отдельных листов, из которых собирается сердечник, в них штампуют пазы. Чаще всего пазы выполняются открытыми или полузакрытыми прямоугольной формы. Для охлаждения обмотки в сердечнике делаются вентиляционные каналы.

Охлаждение электрических машин, в особенности мощных синхронных генераторов, имеет большое значение. Достаточно указать, что при мощности генератора в 100 000 *квт* при к.п.д., равном 0,98, потери достигают 2000 *квт* или 480 больших калорий в секунду. Поэтому для охлаждения машин требуется усиленная вентиляция. В последние годы воздушное охлаждение мощных синхронных генераторов заменяется водородным. При применении в качестве охлаждающего газа водорода прежде всего снижается мощность, затрачиваемая на вентиляцию, так как его плотность

значительно меньше плотности воздуха. Теплопроводность водорода в 7,4 раза выше, чем у воздуха, что значительно улучшает условия охлаждения.

Заводом «Электросила» выпускаются в настоящее время турбогенераторы с водородным охлаждением мощностью 110 000 *ква* при скорости вращения 3000 об/мин.

Обмотка статора выполняется в виде отдельных секций, которые затем укладываются в пазы. Различают пазы: а) открытые, б) полузакрытые и в) закрытые. Полузакрытые пазы делаются у машин малой мощности низкого напряжения, например у асинхронных двигателей. Перед укладкой обмотки в пазы они изолируются. При полузакрытых пазах секции закладываются в пазы по одному проводнику (насыпная обмотка), а при открытых пазах активная сторона изолированной секции закладывается в паз целиком. После укладки секций в пазы они соединяются между собой по определенным электрическим схемам.

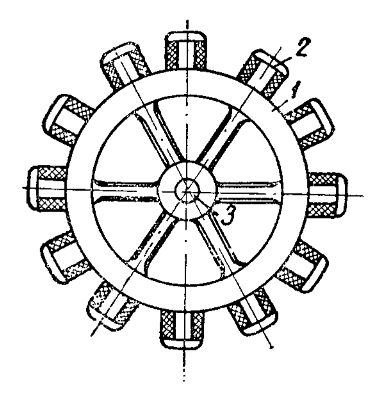



Рис. 98. Ротор с явно выраженными полюсами:
1—роторная звезда; 2—полюсы с полюсными катушками; 3—вал

Ротор синхронной машины, как было указано, служит для создания основного магнитного потока. По конструкции различают роторы с явно выраженными и неявно выраженными полюсами.

Ротор с явно выраженными полюсами (рис. 98) состоит из стального вала, роторной звезды, на ободе которой крепятся полюсы ротора, и полюсов возбуждения с полюсными катушками, соединенными последовательно.

Как уже отмечалось, при больших скоростях 1500 и 3000 об/мин, исходя из соображений механической прочности, ротор

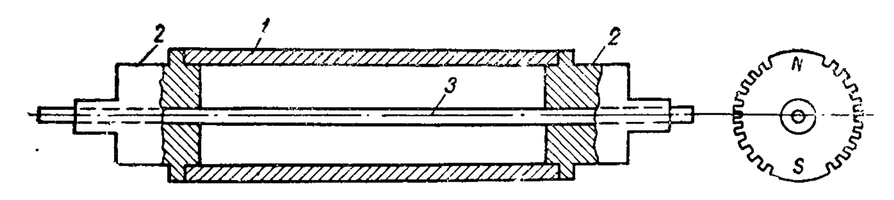



Рис. 99. Составной ротор:
1—бочка; 2—хвостовина; 3—вал

выполняется цилиндрическим составным или из цельной стальной поковки с выфрезерованными на его поверхности продольными пазами, в которые закладывается обмотка возбуждения.

Составной ротор (рис. 99) состоит из центральной бочки и двух хвостовин. Пазы для обмотки возбуждения выфрезеровываются

на наружной поверхности бочки. Пазы размещаются равномерно только на 2/3 поверхности ротора. Остальную часть поверхности занимают центральные зубцы.

Проводники обмотки надежно закрепляются в пазах медными или алюминиевыми клиньями.

Лобовые части обмотки закрепляются бандажными кольцами, выполненными из особо прочной стали.

На валу ротора устанавливаются контактные кольца, к которым подводятся выводы обмотки возбуждения. Кольца надежно изолируются от вала. К ним прилегают щетки, укрепленные в щеткодержателях. Через щетки и кольца производится питание обмотки возбуждения. Щеткодержатели устанавливаются на пальцах траверсы, которая укрепляется на втулке подшипникового щита генератора.

## § 44. ПИТАНИЕ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Питание обмотки возбуждения синхронных генераторов производится постоянным током. Применяются следующие способы питания обмоток возбуждения:

а) независимое питание, при котором источником тока для обмотки возбуждения является возбудитель (генератор постоянного тока с самовозбуждением), устанавливаемый на общем валу с ротором генератора. Когда первичный двигатель начинает вращать ротор генератора, возбудитель самовозбуждается и становится источником постоянного тока для обмотки возбуждения генератора;

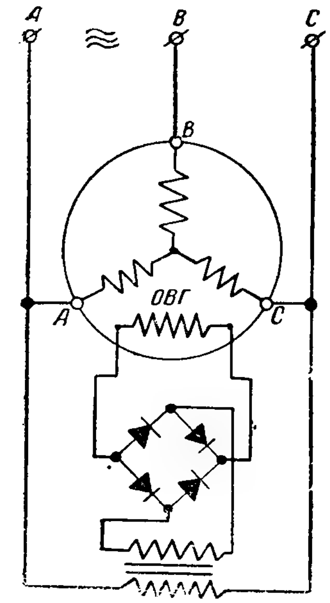


Рис. 100. Схема самовозбуждения синхронного генератора

б) самовозбуждение синхронного генератора, при котором генератор возбуждается за счет остаточной индукции в его полюсах. Возникающий в его рабочей обмотке переменный ток выпрямляется посредством твердых выпрямителей (селеновых) и течет в обмотке возбуждения, вызывая усиление магнитного потока (рис. 100); этот способ разработан С. Б. Юдицким;

в) с постоянными магнитами; недостаток рассматриваемого способа заключается в трудности регулирования магнитного потока и соответственно величины э. д. с. генератора.

До настоящего времени наибольшее распространение имеет возбуждение генераторов от возбудителей, однако начинают также применяться синхронные генераторы небольшой мощности с самовозбуждением по способу, предложенному С. Б. Юдицким.

## § 45. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Согласно закону электромагнитной индукции мгновенное значение э. д. с. определяется по формуле:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Знак минус в формуле показывает, что э.д.с. отстает от потока на угол 90°.

Э.д.с. изменяется во времени синусоидально и магнитный поток будет представлять собой косинусоидальную величину[1].

$$\Phi = \Phi_{макс}\cos\omega t.$$

Действительно, если теперь в формулу мгновенного значения э.д.с. подставить значение потока $\Phi$, мгновенное значение первичной э.д.с. будет равно

$$e = -\frac{d\Phi_{макс}\cos\omega t}{dt} = \omega\Phi_{макс}\sin\omega t = \omega\Phi_{макс}\cos(90^\circ - \omega t) =$$
$$= \omega\Phi_{макс}\cos(\omega t - 90^\circ),$$

что и было отмечено выше.

При $\sin\omega t = 1$ первичное значение э.д.с равно:

$$E_{макс} = \omega\Phi_{макс} = 2\pi f\Phi_{макс}.$$

Если же обмотка имеет $w$ последовательно соединенных между собой витков, общая э.д.с. обмотки будет выражаться уравнением

$$E_{макс} = 2\pi f w\Phi_{макс}.$$

В данном случае $\Phi_{макс}$ равен полному потоку $\Phi$, выходящему из одного полюса. Поэтому в дальнейшем в данных формулах у потока $\Phi$ индекс «макс» ставиться не будет.

Но при определении э.д.с. важно знать не максимальное, а действующее ее значение, которое равно:

$$E = \frac{E_{макс}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w\Phi_{макс} = 4{,}44 f w\Phi \quad [в], \qquad (112)$$

где:

$f$ — частота переменного тока в пер/сек;
$w$ — число витков на фазу;
$\Phi$ — магнитный поток в *в. сек.*

Если секция будет иметь укороченный шаг, т. е. $y < \tau$, охватываемый ею поток будет меньше, чем при $y = \tau$. Следовательно,

[1] Здесь надо иметь в виду, что если при дифференцировании получается синусоидальная величина, то дифференцируемая величина всегда будет косинусоидальной.

и э. д. с., наводимая в секции, тоже будет меньше. Это уменьшение э.д.с. определяется коэффициентом укорочения шага $k_y$. Коэффициент укорочения $k_y$ можно рассматривать как отношение э.д.с. машины с укороченным шагом к э.д.с. такой же машины с полным шагом.

Тогда э.д.с. секции будет равна

$$E = 4{,}44 f k_y w \Phi \quad [в]. \qquad (113)$$

Э.д.с. секционной группы равна геометрической сумме э.д.с., входящих в группу секций. Отношение геометрической суммы э.д.с. отдельных секций к арифметической сумме этих э.д.с. характеризуется коэффициентом распределения $k_p$.

Так как секционная группа занимает часть пазов, то векторная диаграмма э.д.с. индуктируемых сторон изобразится неполной звездой (рис. 101, *а*).

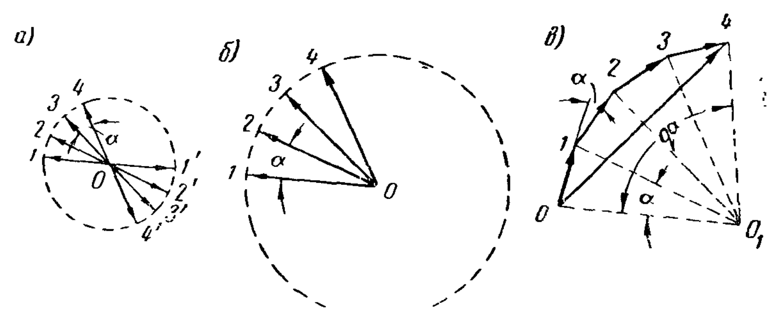



Рис. 101. Векторная диаграмма пазовых э.д.с.

Прибавляя к вектору $\overline{0,1}$ вектор $\overline{0,1'}$ с обратным знаком, получаем вектор, изображающий по величине и по фазе э.д.с. одной секции.

Аналогичным образом получим для всех катушек диаграмму (рис. 101, *б*), имеющую $q$ лучей, с тем же углом сдвига $\alpha$ между лучами, что и на диаграмме, изображенной на рис. 101, *а*.

Э.д.с. всей секционной группы (см. рис. 101), состоящей из $q$ секций, соединенных между собой последовательно (конец одной катушки соединяется с началом второй катушки и т. д.), равна геометрической сумме всех $q$ векторов диаграммы.

На рис. 101,*в* размер векторов э.д. с. уменьшен вдвое по сравнению с рис. 101, *б*.

В результате геометрического сложения векторов, повернутых один относительно другого на равные углы $\alpha$, получаем ломаную линию, состоящую из $q$ отрезков. При этом э.д.с. (результирующая э.д.с.) будет равна замыкающему вектору, величина которого меньше арифметической суммы э.д.с. секций, т. е.

$$k_p = \frac{\text{геометрическая сумма э. д. с. отдельных секций}}{\text{арифметическая сумма тех же э. д. с.}}$$

При определении фазной э.д.с. следует учитывать оба этих коэффициента, произведение которых называется **обмоточным коэффициентом** $k_{об}$:

$$k_{об}=k_y k_p=0{,}90-0{,}92.$$

Окончательно э. д. с. одной фазы обмотки определяется по формуле:

$$E=4{,}44 f k_{об} w \Phi \quad [в]. \qquad (114)$$

Характер изменения э.д.с. в проводнике зависит от характера изменения магнитной индукции в зазоре по окружности статора.

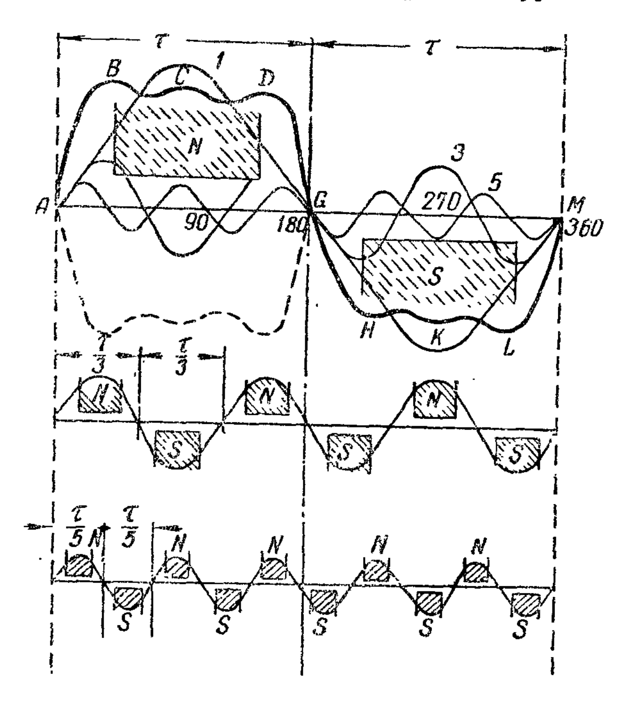



Рис. 102. Распределение магнитной индукции в зазоре синхронной машины

Чтобы получить синусоидальную э.д.с., кривая распределения индукции по окружности статора тоже должна быть синусоидальной. Для этого необходимо придать определенную форму полюсным наконечникам, у которых несколько скашиваются края.

В общем случае (рис. 102) распределение индукции в зазоре по окружности статора под двумя полюсами на протяжении двойного полюсного деления 2τ характеризуется кривой *ABCDGHK LM*. Эта кривая разлагается на ряд гармонических (ряд Фурье), представляющих собой сумму синусоид гармонических составляющих нечетного порядка, имеющих общие точки пересечения на оси абсцисс (точки *A*, *G*, *M*).

Рассматривают основную — первую гармоническую *1* и две высших гармонических — третью *3* и пятую *5*, имеющих основания $\frac{\tau}{3}$ и $\frac{\tau}{5}$.

Высшие гармонические кривые мало влияют на действующее значение результирующей э.д.с., однако они сильно искажают форму кривой э.д.с. в проводнике. Это заставляет применять специальные меры для уничтожения искажающего влияния высших гармоник, например укорачивая шаг обмотки.

По ГОСТ 183—55 допустимое искажение синусоидальности кривой напряжения синхронных генераторов при холостом ходе и номинальном напряжении может быть: для генераторов мощностью свыше 1000 *ква* не более 5%; для генераторов мощностью от 10 до 1000 *ква* не более 10%.

## § 46. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Основной магнитный поток синхронного генератора создается его обмоткой возбуждения и если машина работает вхолостую при разомкнутой обмотке статора, то $\Phi = \Phi_m$. Однако при работе машины под нагрузкой ток в обмотке статора создает свое магнитное поле. Естественно, что поток этой обмотки будет взаимодействовать с потоком обмотки возбуждения и результирующий магнитный поток будет отличаться от потока холостого хода как по форме, так и по величине. Это явление—взаимодействия магнитных полей статора и ротора — называется «**реакцией якоря» синхронного генератора**, так как сердечник статора иногда называют якорем.

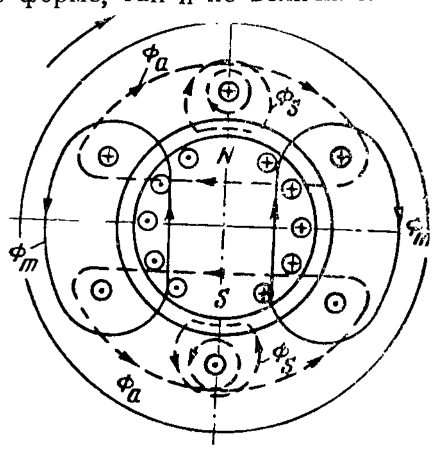



Рис. 103. Реакция якоря синхронного генератора

Реакция якоря синхронного генератора зависит не только от величины, но и от характера нагрузки, т. е. от сдвига фаз между напряжением и током.

При активной нагрузке ток совпадает по фазе с э.д.с. Для индуктивной и емкостной нагрузок угол сдвига фаз равен $\pm 90°$. Для определения влияния реакции якоря на основное поле возбуждения возьмем момент, когда в секции обмотки статора э.д.с. имеет наибольшую величину (при нахождении активных сторон секции против середины полюсов ротора).

Магнитные силовые линии поля (рис. 103), создаваемого полюсами, показаны на рисунке сплошными, а магнитные силовые

линии поля статора — пунктирными линиями. Это поле можно разделить на две части. Магнитные силовые линии одной части поля охватывают проводники обмотки, замыкаясь в стали статора и воздушном зазоре. На основное магнитное поле эта часть магнитного потока поля статора никакого влияния не оказывает и называется потоком рассеяния статора $\Phi_S$.

Поток рассеяния статора наводит в его обмотке э. д. с. самоиндукции $E_S=\omega\ I\ L_S$, сдвинутую по фазе относительно тока на 90°. Величина $\omega L_S=2\pi f L_S$ является индуктивным сопротивлением обмотки статора.

Э.д.с. самоиндукции, наводимая потоком рассеяния, уравновешивается реактивным падением напряжения в обмотке статора

$$\Delta U_p=Ix_L=I(2\pi f L_S). \tag{115}$$

Магнитные силовые линии второй части потока замыкаются в стали ротора (индуктора) и взаимодействуют с основным магнитным потоком машины. Они образуют магнитный поток реакции якоря $\Phi_a$. Вследствие этого результирующее магнитное поле оказывается ослабленным и искаженным по сравнению с полем холостого хода.

На рис. 104,*а* показана в виде эквивалентной катушки одна фаза обмотки статора, находящаяся в данный момент на оси полюсов. В этот момент наводимая в ней э.д.с. имеет наибольшую величину $E_{макс}$. При чисто активной нагрузке ток в фазе достигает своего наибольшего значения одновременно с э.д.с. ($\psi=0°$). Создаваемое этим током магнитное поле является поперечным и действует так же, как в машинах постоянного тока, ослабляя основное поле под набегающим краем полюса и усиливая его под сбегающим краем. На рис. 104,*а* м. д. с. и поле полюсов показано синусоидой *1*, а м. д. с. ротора с неявно выраженными полюсами — синусоидой *2*.

Кривая поля ротора зависит от его исполнения. У ротора с явно выраженными полюсами магнитное сопротивление $R_м$ между полюсами значительно больше, чем под ними. Кривая *3* магнитной индукции этого ротора в зазоре имеет провалы, соответствующие промежуткам между полюсами. Поэтому поток реакции якоря машины с явно выраженными полюсами будет меньше, чем у машины с неявно выраженными полюсами.

Уменьшение амплитуды м. д. с. поперечной реакции якоря учитывается коэффициентом поперечной реакции якоря $k_q$. Этот коэффициент для обычных машин равен $k_q=0{,}4$—$0{,}5$. С учетом коэффициента $k_q$ амплитуда м. д. с. поперечной реакции якоря для машины с явно выраженными полюсами равна:

$$F'_{aq}=k_qF_{aq}, \tag{116}$$

где $F_{aq}$ — м. д. с. машины с неявно выраженными полюсами.

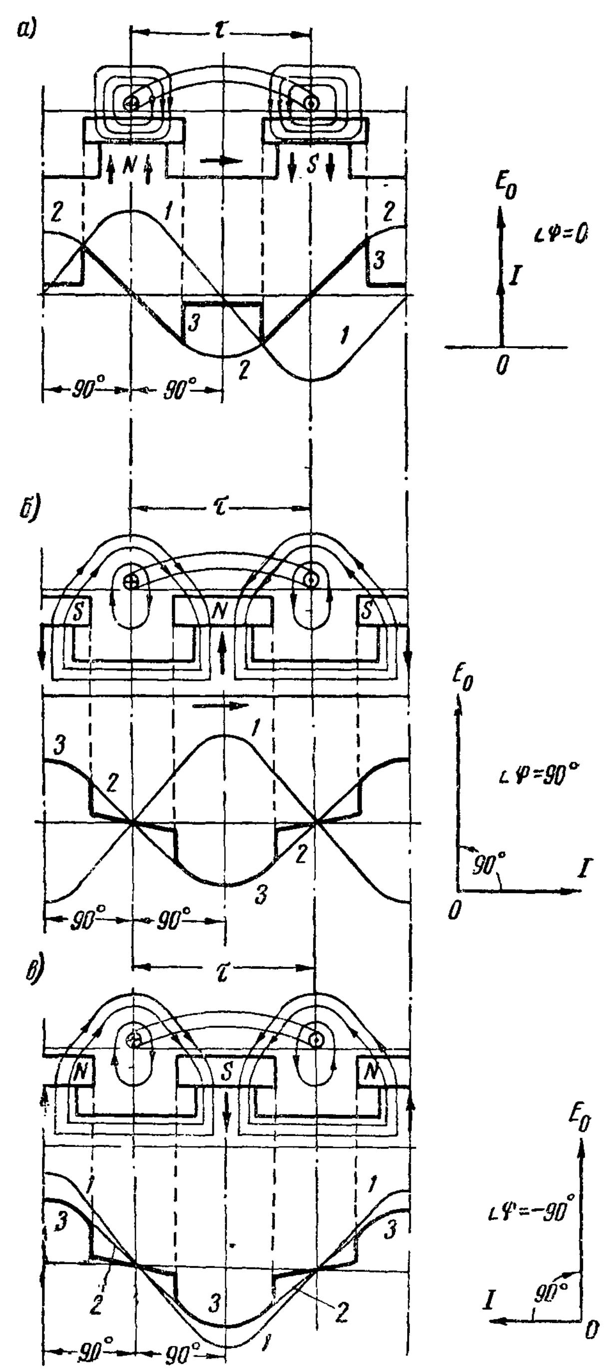



Рис. 104. Кривые м. д. с. полюсов и статора при:
*а*—активной нагрузке; *б*—чисто индуктивной нагрузке; *в*—чисто емкостной нагрузке

Совершенно иная картина будет при наличии сдвига фаз между током и э.д.с.

При чисто индуктивной нагрузке между током и э.д.с. существует сдвиг фаз на $+90°$ и ток $I$ достигает своего амплитудного значения лишь через 1/4 периода после э.д.с. $E_0$. При этом ось ротора повернется за то же время на 90° по направлению его вращения (рис. 104,*б*). В этом случае ось поля статора уже направлена навстречу оси поля полюсов и реакция якоря имеет продольно-размагничивающий характер.

Емкостная нагрузка создает между током и э.д.с. сдвиг фаз на $-90°$, и действие реакции якоря синхронного генератора в этом случае будет противоположным действию реакции якоря при чисто индуктивной нагрузке, т. е. будет иметь продольно-намагничивающий характер.

Обычно синхронные генераторы работают со смешанной активно-индуктивной нагрузкой и имеют угол $\psi$ меньше 90°. Создаваемое проводниками обмотки статора магнитное поле реакции якоря будет сдвинуто на определенный угол $\psi$, равный углу сдвига фаз между э.д.с. и током в статоре. Ось потока реакции образует с осью основного поля угол $\alpha=90°+\psi$. Ток в статоре может быть разложен на две составляющие: активную $I_q=I\cos\psi$ и реактивную $I_d=I\sin\psi$. Первая составляющая создает поперечную м. д. с. реакции якоря $F_{aq}$, вторая—продольную м. д. с. реакции якоря $F_{ad}$, действующую при индуктивной нагрузке в направлении, обратном действию м. д. с. основного магнитного потока $F_0$.

Разберем случай, когда ток генератора $I$ отстает от э.д.с. $E_0$ на 90°. На диаграмме (рис. 105) вектор $OA$ обозначает м. д. с. полюсов $F_0$ или в соответствующем масштабе — основной магнитный поток $\Phi_m$. Вектор $Oa$ — м. д. с. продольной реакции якоря — направлен в противоположную сторону относительно вектора $OA$ — м. д. с. полюсов $F_0$. В этом случае вектор $Oc$, обозначающий м. д. с. реакции якоря $F_a$, будет сдвинут относительно вектора $E_0$ на угол $\psi$.

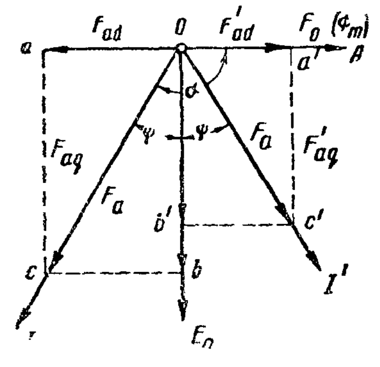



Рис. 105. Диаграмма м.д.с. при индуктивной и емкостной нагрузках

Если ток $I$ опережает по фазе э.д.с. $E_0$ на угол 90°, вектор продольной м. д. с. реакции якоря $F'_{ad}$ будет направлен в ту же сторону, что и вектор $OA$ м. д. с. полюсов $F_0$. Тогда м. д. с. реакции якоря $F_a'$ изобразится вектором $Oc'$.

## § 47. ОБМОТКИ СТАТОРА СИНХРОННЫХ МАШИН

В обмотке статора наводится э.д.с. заданной величины и синусоидальной формы. Получение синусоидальной э.д.с. является

важнейшей задачей при конструировании синхронного генератора. Синусоидальность э.д.с. должна сохраняться не только при холостом ходе, но и при работе машины под нагрузкой.

К обмоткам статора предъявляются следующие требования:

а) расход меди при выполнении обмотки должен быть наименьшим;

б) обмотка должна обладать достаточной механической и диэлектрической прочностью;

в) потери в меди должны быть по возможности минимальными, а охлаждение обмоток как можно лучше.

Ширина витка обмотки должна быть примерно равной полюсному делению $y \approx \tau$. Однако с целью улучшения формы кривой э.д.с. в проводнике виток делают с укороченным шагом, при котором $y < \tau$. В соответствии с этим различают обмотки с полным и укороченным шагом.

Группа витков, соединенных между собой последовательно и уложенных в два паза с расстоянием между пазами, равным полюсному делению $y \approx \tau_1$, называется катушкой.

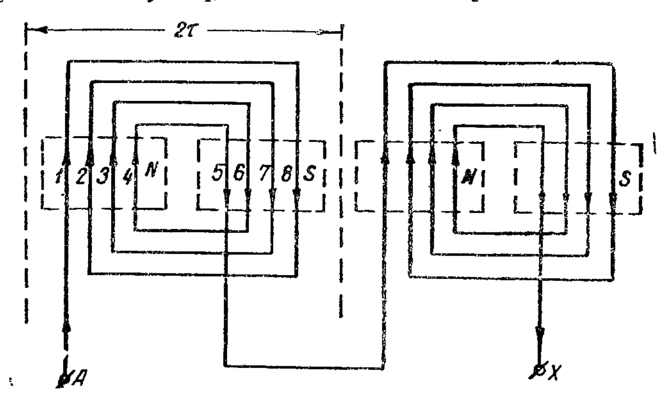



Рис. 106. Схема однофазной распределенной обмотки статора

В зависимости от того, занимает ли катушка весь паз или только его половину, различают однослойные и двухслойные обмотки.

На рис. 106 показан пример выполнения однослойной, так называемой распределенной обмотки. Распределенной называется обмотка, у которой число катушек на пару полюсов или, иначе говоря, число пазов на полюс больше единицы ($q = 2$; $q = 3$...). В данном случае обмотка состоит из двух катушек, одинаково расположенных под двумя парами полюсов. Катушки соединены между собой последовательно, однако они могут быть соединены и параллельно. При последовательном соединении катушек конец первой катушки соединяется с началом второй. Э. д. с., наводимые в катушках, будут при этом складываться. Начало первой катуш-

ки $A$ и конец второй катушки $X$ являются началом и концом фазной обмотки.

При параллельном соединении катушек их начала соединяются в общую точку $A$, образуя начало фазной обмотки, а концы в общую точку $X$, образуя конец фазной обмотки.

Для приведенной обмотки характерно, что ширина отдельных, последовательно соединенных катушек *4-5, 3-6, 2-7* и *1-8* различна, и можно говорить лишь о среднем шаге, равном полюсному делению $y=\tau$. Величина результирующей э.д.с. такой обмотки будет равна сумме э.д.с., наводимых в отдельных проводниках.

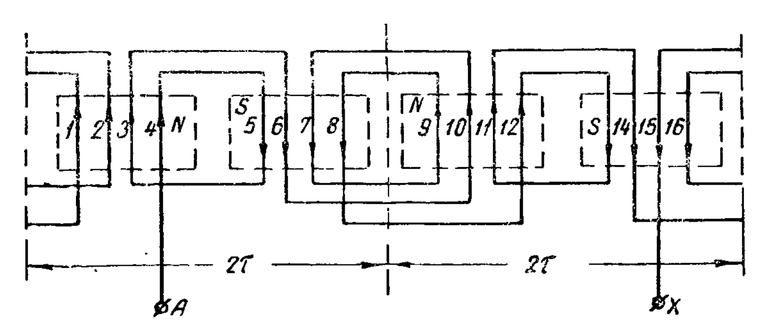



Рис. 107. Схема однофазной обмотки статора с сокращенной лобовой частью

Недостатком рассмотренной обмотки является большой расход меди в лобовых частях обмотки. Этот недостаток в известной степени устраняется при выполнении обмотки согласно схеме, изображенной на рис. 107. Катушки *4-5* и *3-6* укладываются так же, как и в предыдущем случае. Затем, вместо того чтобы следующие две катушки укладывать в пазы *7-2* и *8-1*, их укладывают в пазы *7-10* и *8-9*. От этого направление наводимых в проводниках э.д.с. не меняется, а длина лобовой части уменьшается. Укладка в пазы остальных катушек аналогична укладке первых четырех катушек.

Трехфазная обмотка представляет собой сочетание трех однофазных обмоток, смещенных относительно друг друга на одну треть двойного полюсного деления $2/3\ \tau$ или на 120 электрических градусов.

На рис. 108 приведен пример выполнения распределенной трехфазной однослойной обмотки с полным шагом. Обмотка имеет следующие данные: $2p=4$, $m=3$, $q=2$. Соединение однофазных обмоток — звездой.

На основании этих данных определяем:

$$Z=2pmq=4\cdot 3\cdot 2=24.$$

На одну пару полюсов приходится двенадцать пазов. Угол сдвига фаз между соседними пазами равен:

$$\alpha = \frac{360}{12} = 30^{\circ} \text{ (электрических градусов).}$$

Для выполнения этой обмотки сначала надо вычертить векторную звезду пазовых э.д.с. (рис. 109). Примем условно, что в рассматриваемый момент проводник *1*, уложенный в паз *1*, на-

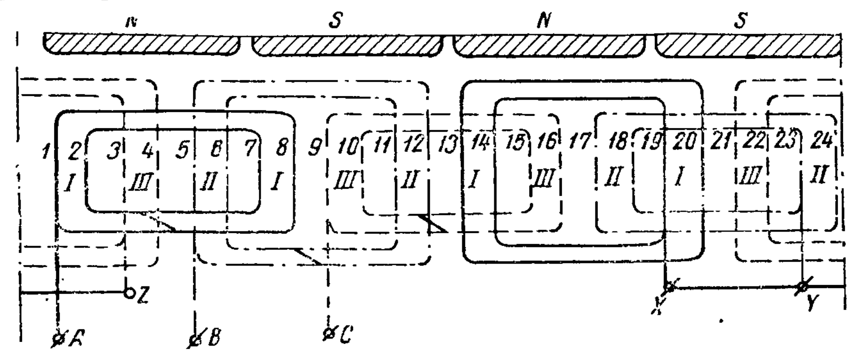



Рис. 108. Схема трехфазной распределенной однослойной обмотки

ходится на нейтрали. Вектор э.д.с. $e_1$, наводимой в данном проводнике, будет направлен вдоль начальной оси. При вращении полюсов против часовой стрелки вектор э.д.с. $e_2$, в проводнике *2*, находящемся в пазу *2*, будет сдвинут относительно вектора э.д.с. $e_1$ на угол сдвига пазов, т. е. на 30° (по часовой стрелке). Откладывая в том же порядке векторы э.д.с. $e_3$, $e_4$, $e_5$....... $e_{11}$, $e_{12}$, наводимых в соответствующих проводниках, получим, что вектор э. д. с. $e_{13}$, совпадая по величине и направлению с вектором $e_1$, сложится с ним. Соответственно совпадут с направлением и величиной векторов $e_2$, $e_3$, $e_4$ и т. д. векторы $e_{14}$, $e_{15}$, $e_{16}$ и т. д.

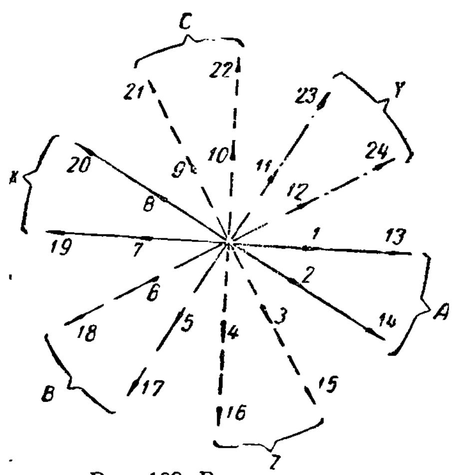



Рис. 109. Векторная звезда к обмотке, изображенной на рис. 108

Первую фазу $A-X$ начнем укладывать с пазов *1* и *2*, имея в виду, что $q = 2$. Тогда вторые стороны катушек должны лечь в пазы *7* и *8* ($y = \tau$). Соответственно под второй парой полюсов катушки первой фазы должны быть уложены в пазы *13-14* и *19-20*.

Начало и конец первой фазы обозначены буквами *A* и *X*. Вторая фаза должна быть сдвинута относительно первой на 120° (электрических), т. е. на $\frac{120}{30}=4$ паза.

Катушки второй фазы *B—Y* должны быть уложены в пазы *5-6, 11-12, 17-18* и *23-24*. Третья фаза *C—Z* сдвинута относительно второй фазы *B—Y* также на 120° (электрических). Ее катушки укладываются в пазы *9-10, 15-16, 21-22* и *3-4*. Так как обмотка имеет схему соединения в звезду, то концы фаз *X, Y, Z* соединяются между собой.

Чаще всего обмотки синхронных генераторов выполняются двухслойными с укороченным шагом. Эта обмотка выполняется так же, как и у машин постоянного тока: одна сторона катушки этой обмотки лежит в верхней половине паза, другая — в нижней.

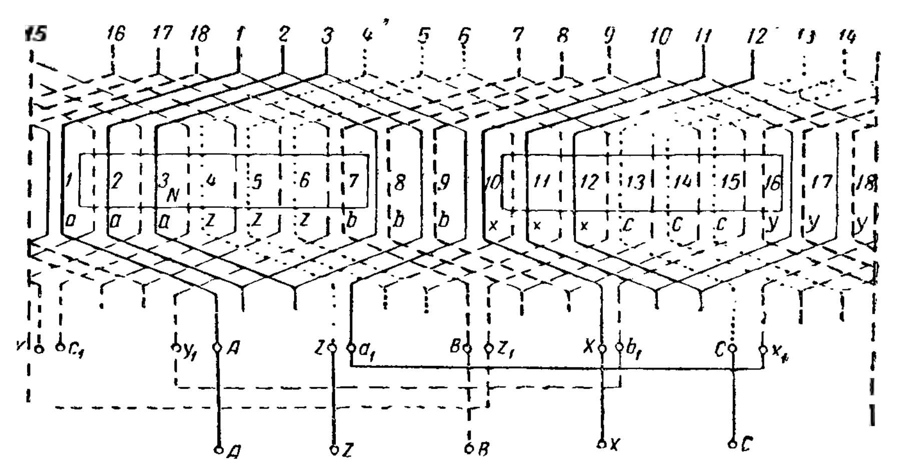



Рис. 110. Схема трехфазной двухслойной обмотки

На рис. 110 дан пример выполнения такой обмотки, имеющей следующие данные: $2p=2$, $m=3$, $Z=18$, $y=7/9\,\tau$. Число пазов на полюс и фазу, исходя из заданных величин, будет:

$$q=\frac{Z}{2pm}=\frac{18}{2\cdot 3}=3 \quad \text{и} \quad \alpha=\frac{360°}{18}=20°.$$

Векторная звезда для этого случая дана на рис. 111. Здесь каждый вектор представляет собой э.д.с. катушки, т. е. суммарную э.д.с., наводимую в обеих ее сторонах. Особенностью схемы, данной на рис. 110, является то, что в ней каждая фаза, состоящая из шести катушек, подразделена на две группы по три катушки в каждой. Это сделано для улучшения коэффициента распределения, характеризующего, насколько полно используется э.д.с., которая может быть получена в данной обмотке.

Из векторной звезды видно, что в группах, составленных из катушек *1-2-3* и *10-11-12*, наводятся одинаковые по величине, но

разные по направлению э.д.с. Чтобы получить согласное действие этих э.д.с., надо соединить конец группы $a_1$ с концом группы $x_1$. Шаг обмотки равен $y=7/9\ \tau=7$ пазам. Поэтому сторону катушки *1*, лежащую в верхнем слое паза *1*, надо соединить со стороной (1+7=8), лежащей в нижней половине паза *8*. Таким образом первая группа катушек фазы $A-X$ укладывается в пазы *1-8*, *2-9* и *3-10*. Вторая группа катушек фазы $A-X$ будет уложена в пазы *10-17*, *11-18* и *12-1*. Концы групп $a_1$ и $x_1$ соединяются между собой.

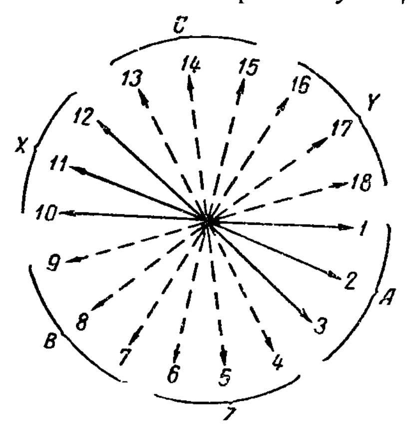



Рис. 111. Векторная звезда к трехфазной двухслойной обмотке, изображенной на рис. 110

Аналогично выполняются вторая и третья фазы.

В соответствии с ГОСТ 183—55 обозначения выводов обмоток электрических машин трехфазного переменного тока должны производиться по табл. 7.

Таблица 7

| Наименование и схема соединения обмоток | Число выводов | Название выводов | Обозначение выводов: начало | Обозначение выводов: конец |
|---|---|---|---|---|
| **Обмотки статора (якоря)** | | | | |
| Открытая схема (начала и концы обмоток выведены наружу, на щиток машины) . . | 6 | Первая фаза . . . | С1 | С4 |
| | | Вторая фаза . . . . | С2 | С5 |
| | | Третья фаза . . . . | С3 | С6 |
| Соединение звездой . . | 3 и 4 | Первая фаза . . . | С1 | |
| | | Вторая фаза . . . . | С2 | |
| | | Третья фаза . . . . | С3 | |
| | | Нулевая точка . . . | 0 | |
| Соединение треугольником . . . . . . | 3 | Первый зажим . . . | С1 | |
| | | Второй зажим . . . | С2 | |
| | | Третий зажим . . . | С3 | |
| **Обмотки возбуждения синхронных машин** | 2 | — . . . | И1 | И2 |

## § 48. ДИАГРАММЫ Э. Д. С. СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Э.д.с. холостого хода синхронного генератора отличается по величине от напряжения на его зажимах при нагрузке. Это объясняется: 1) изменением результирующего магнитного поля ма-

шины под воздействием реакции якоря; 2) потоком рассеяния в статоре; 3) падением напряжения в активном и индуктивном сопротивлениях обмотки статора.

Изменение напряжения на зажимах синхронного генератора при изменении нагрузки является одной из важнейших величин, определяющих работу генератора. Факторы, влияющие на величину напряжения синхронного генератора, проще всего изобразить графически в виде основной диаграммы э.д.с. При построении этой диаграммы условно принимается, что поперечный и продольный потоки реакции якоря $\Phi_{ad}$ и $\Phi_{aq}$ и поток рассеяния $\Phi_s$, независимо как от основного потока $\Phi_m$ так и друг от друга, наводят в обмотке статора соответствующие э.д.с. $E_{ad}$, $E_{aq}$ и $E_s$.

Если еще учесть э.д.с. активного сопротивления $E_a$ и геометрически сложить все э.д.с., то будет получено напряжение $U$ на зажимах генератора.

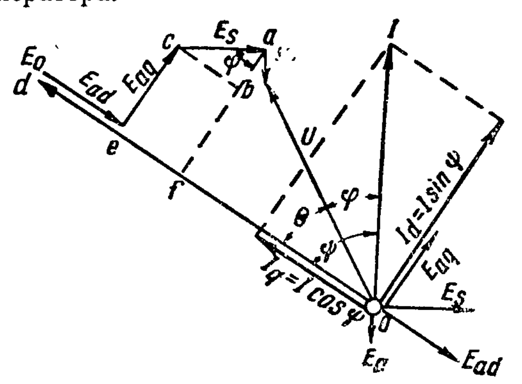



Рис. 112. Основная диаграмма э. д. с.

Диаграмма строится в следующем порядке (рис. 112). Вертикально вверх откладывается вектор тока $\bar{I}$. Предположим, что э.д.с. $E_0$ опережает ток на некоторый угол $\psi$, и отложим вектор э.д.с. $\bar{E_0}$ под заданным углом против часовой стрелки. Ток $I$ может быть разложен на его составляющие: активную $I_q$, равную $I_q = I\cos\psi$, создающую поперечную м. д. с. реакции якоря, и индуктивную $I_d$, равную $I_d = I\sin\psi$, создающую продольную м. д. с. реакции якоря. Потоки $\Phi_{aq}$ и $\Phi_{ad}$ совпадают по фазе с токами $I_q$ и $I_d$.

Каждый из этих потоков $\Phi_{aq}$ и $\Phi_{ad}$ создает свою э.д.с. $E_{aq}$ и $E_{ad}$, которые отстают на 90° от соответствующих магнитных потоков.

Поток рассеяния $\Phi_s$ создается током $I$ и совпадает с ним по фазе, а наводимая им э.д.с. отстает по фазе от тока на 90°. Э.д.с. активного сопротивления $E_a$ создается током $I$ и ее вектор сдвинут относительно вектора тока $I$ на 180°.

Если теперь сложить все э. д. с. в определенной последовательности: $\bar{E}_o + \bar{E}_{ad} + \bar{E}_{aq} + \bar{E}_s + \bar{E}_a$, то будет получен вектор напря-

жения $\overline{U}$. Угол сдвига фаз между током $I$ и напряжением $U$ определяется углом $\varphi$, зависящим от нагрузки.

С помощью основной диаграммы могут быть построены упрощенные диаграммы для определения изменения напряжения. При этом надо иметь в виду, что э.д.с. $E_{aq}$ и $E_{ad}$, наводимые потоками $\Phi_{aq}$ и $\Phi_{ad}$, могут быть выражены через соответствующие токи $I_q$ и $I_d$, создающие эти потоки, и сопротивления $x_q$ и $x_d$ будут равны:

$$E_{aq} = I_q x_{aq} = I\cos\psi x_{aq}, \qquad (117)$$

$$E_{ad} = I_d x_{ad} = I\sin\psi x_{ad}, \qquad (117a)$$

где $x_{aq}$ и $x_{ad}$ — соответственно индуктивные сопротивления поперечной и продольной реакции якоря.

Э.д.с. $E_S$, создаваемая потоком рассеяния $\Phi_S$, может быть разложена на две составляющие: одну, направленную вдоль вектора $E_0$, и вторую, направленную перпендикулярно к ней. Угол $bac$ между векторами $E_S$ и второй составляющей равен углу $\psi$.

Откуда

$$E_S \sin\psi = I x_S \sin\psi = I_d x_S = bc,$$

$$E_S \cos\psi = I x_S \cos\psi = I_q x_S = ab.$$

Из диаграммы следует, что

$$df = de + bc = I_d x_{ad} + I_d x_S = I_d (x_{ad} + x_S) = I_d x_d = E_d,$$

$$af = bf + ab = I_q x_{aq} + I_q x_S = I_q (x_{aq} + x_S) = I_q x_q = E_q.$$

Суммарные сопротивления $x_{ad} + x_S = x_d$ и $x_{aq} + x_S = x_q$ называются **продольным** и **поперечным синхронными индуктивными сопротивлениями машины.**

У ненасыщенных машин с неявно выраженными полюсами параметры $x_{ad}$ и $x_{aq}$ можно считать постоянными. Однако при насыщении стали машины параметр $x_{ad}$ уменьшается, так как продольная составляющая реакции якоря проходит по более длинному пути в стали, чем поперечная, которая большую часть пути проходит по воздуху и поэтому не зависит от насыщения стали. Основная диаграмма э. д. с. может быть преобразована и представлена в более простом виде (рис. 113). При построении этой диаграммы пренебрегают активным сопротивлением обмотки статора из-за его незначительной величины (рис. 113, *а*). При индуктивной нагрузке э. д. с. $E_d$ направлена встречно по отношению к э. д. с. $E_0$, так как продольная м. д. с. реакции якоря размагничивает генератор. В результате этого с увеличением нагрузки напряжение на зажимах генератора уменьшается.

При емкостной нагрузке (рис. 113, *б*) э. д. с. $E_d$ направлена согласно э. д. с. $E_0$, так как продольная э. д. с. в этом случае

намагничивает генератор и напряжение на его зажимах увеличивается.

Для ненасыщенного генератора с неявновыраженными полюсами, у которого $x_d = x_q = x_{cx}$, может быть составлена упрощенная диаграмма (рис. 114).

Если известно синхронное индуктивное сопротивление генератора $x_{cx}$ и генератор работает с номинальной нагрузкой, то диаграмма строится следующим образом. Вектор тока $\bar{I}$ откладывается вертикально вверх. Под углом $\varphi$ к вектору тока откладывается вектор напряжения $\bar{U}_н$. Из конца этого вектора перпендикулярно вектору тока $\bar{I}$ откладывается вектор $\bar{I}_н x_{cx}$. Тогда замыкающий вектор $Od$ будет представлять собой э. д. с. на зажимах генератора $E_0$. Откуда

$$\Delta U_н = \frac{E_0 - U_н}{U_н} 100\%. \quad (118)$$

Если из конца вектора $\bar{U}_н$ опустить перпендикуляр на вектор $\bar{Od} = \bar{E}_0$, то получится прямоугольный треугольник $afd$ со сторонами: гипотенуза $ad = I_н x_{cx}$, катет $af = E_q$ и катет $fd = E_d$. Угол $fad = \psi$.

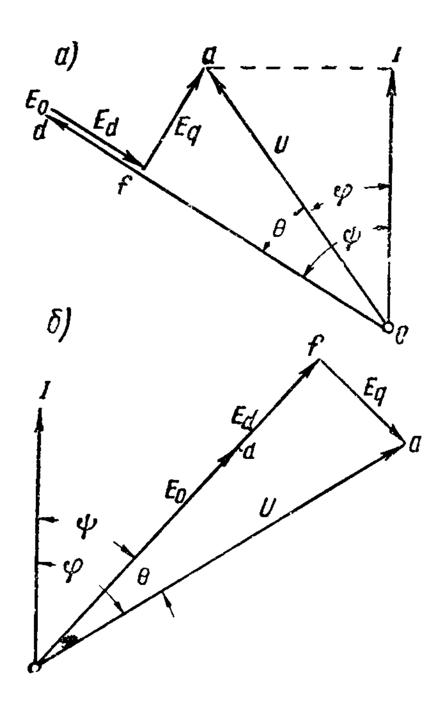



Рис. 113. Преобразованная диаграмма э.д.с.

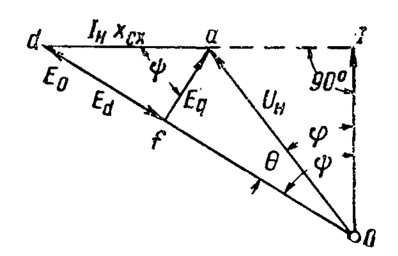


Рис. 114. Упрощенная диаграмма э.д.с.

У генераторов с явновыраженными полюсами и у насыщенных машин действительное значение $x_{cx}$ меньше, чем у ненасыщенных машин. В этом случае для определения изменения напряжения $\Delta U$ за синхронное индуктивное сопротивление $x_{cx}$ может быть принято насыщенное значение $x_d$, определяемое по характеристике холостого хода и нагрузочной индукционной характеристике.

Векторные диаграммы э. д. с. синхронного генератора позволяют изучить работу машины под нагрузкой, определить необходимую величину э. д. с. при различных режимах работы и нагрузках $[E_0 = f(I_a);\ E_0 = f(U);\ E_0 = f(\cos\varphi)]$.

## §. 49. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Свойства синхронных генераторов проще всего выявляются их основными характеристиками: холостого хода, короткого трехфазного замыкания, внешней и регулировочной.

Характеристика холостого хода показывает зависимость э.д.с. генератора от тока возбуждения, т. е. $E_0 = U_0 = f(I_в)$ при частоте $f$=const, скорости вращения $n$=const и токе нагрузки, равном нулю ($I_a = 0$).

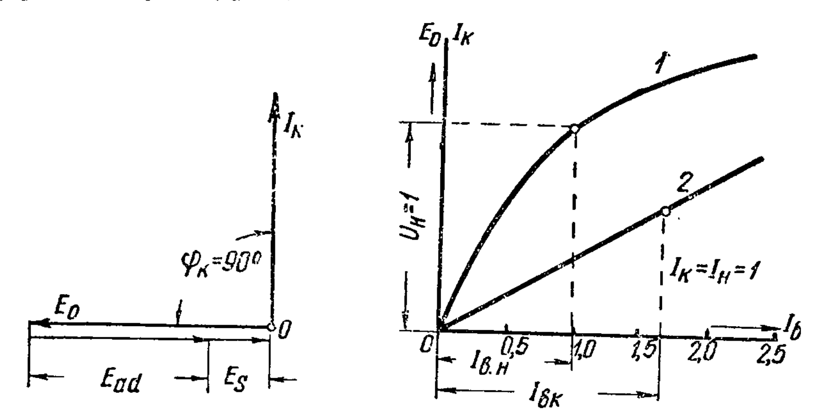



Рис. 115. Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода синхронного генератора практически снимается так же, как и у генераторов постоянного тока. Строящиеся в настоящее время синхронные генераторы имеют так называемую нормальную характеристику холостого хода, выраженную в относительных единицах (рис. 115, кривая *1*). При построении характеристики за единицу напряжения принято номинальное напряжение, а за единицу тока возбуждения такой ток $I_{в.н}$, который при холостом ходе генератора создает единицу напряжения, т. е. $U_0 = U_н$. В табл. 8 приведены данные, относящиеся к нормальной характеристике холостого хода.

Таблица 8

| Ток возбуждения $I_в$ | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| э. д. с. $E_0 = U_0$ | 0 | 0,53—0,58 | 1,0 | 1,21—1,23 | 1,30—1,33 | 1,40 |

По этой характеристике можно судить о степени насыщения стали машины.

Характеристика трехфазного короткого замыкания представляет собой зависимость между током короткого замыкания и током возбуждения $I_к = f(I_в)$ при постоянной частоте $f$=const и $U$=0. Для опыта короткого замыкания генера-

тор включают по схеме, представленной на рис. 116. Генератор приводят во вращение с номинальной скоростью, которую поддерживают постоянной. Постепенно увеличивая ток возбуждения, записывают показания амперметров в цепи возбуждения ($I_в$) и в цепи обмотки статора ($I_к$). При опыте трехфазного короткого замыкания ток в статоре доводят до 1,25 $I_н$. Активное сопротивление обмотки статора очень невелико и при коротком замыкании она обладает практически чисто индуктивным сопротивлением. Поэтому ток короткого замыкания отстает от э. д. с. $E_0$ на угол $\psi \approx 90°$. Этот ток создает только продольную размагничивающую м. д. с. реакции якоря $F_{ad}$. Ей соответствует продольно-размагничивающий поток реакции якоря $\Phi_{ad}$ и э.д.с. реакции якоря

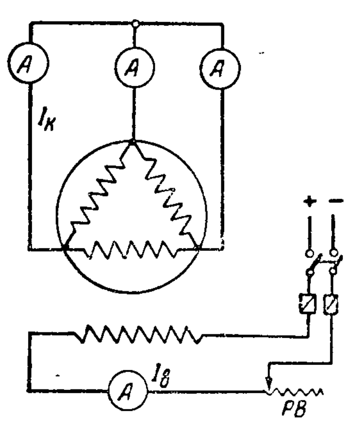


Рис 116. Схема включения генератора при опыте короткого замыкания

$$E_{ad}=I_к x_{ad}. \qquad (119)$$

Кроме потока реакции якоря $\Phi_{ad}$, в машине существует еще поток рассеяния $\Phi_s$, который наводит э. д. с. рассеяния

$$E_S=I_к x_S. \qquad (120)$$

Диаграмма э. д. с. для рассматриваемого случая короткого замыкания дана на рис. 115 (кривая *2*). При коротком замыкании генератор насыщен слабо, так как продольно-размагничивающий поток реакции якоря $\Phi_{ad}$ направлен встречно по отношению к потоку $\Phi_0$, а поток рассеяния составляет всего 10—15% от потока $\Phi_0$.

Характеристика короткого замыкания имеет вид прямой, проходящей через начало координат. Эта характеристика является одной из важнейших, так как по ней можно определить, какая часть тока возбуждения компенсирует реакцию якоря синхронного генератора.

Внешняя характеристика показывает зависимость напряжения на зажимах генератора от тока в цепи якоря, т. е. $U=f(I)$, при скорости $n$=const, токе возбуждения $I_в$=const и коэффициенте мощности $\cos\varphi$=const.

Внешний вид характеристики определяется характером нагрузки генератора. На рис. 117 показаны три внешние характеристики генератора: при активной нагрузке кривая *1* ($\cos\varphi = 1$; $\varphi = 0$), при индуктивной нагрузке кривая *2* ($\cos\varphi = 0{,}8$; $\varphi > 0$) и емкостной нагрузке кривая *3* ($\cos\varphi = 0{,}8$; $\varphi < 0$). При увеличении активной нагрузки напряжение на зажимах генератора уменьшается

незначительно под влиянием падения напряжения в обмотках машины и частично размагничивающей составляющей реакции якоря. При индуктивной нагрузке размагничивающее действие продольной составляющей реакции якоря проявляется сильнее и напряжение на зажимах генератора уменьшается в значительно большей степени. При емкостной нагрузке с ее увеличением происходит подмагничивание машины и напряжение на зажимах машины увеличивается.

По ГОСТ 183—55 синхронные генераторы при номинальных скорости вращения и коэффициенте мощности должны развивать номинальную мощность при отклонениях напряжения от номинального на $\pm 5\%$.

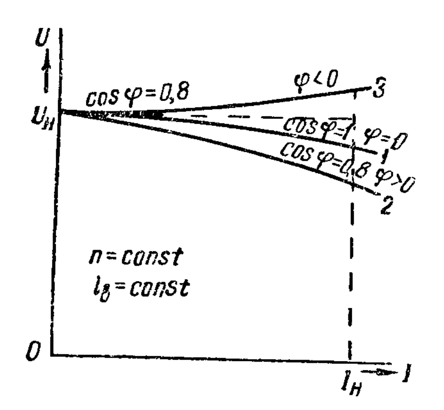



Рис. 117. Внешние характеристики синхронного генератора

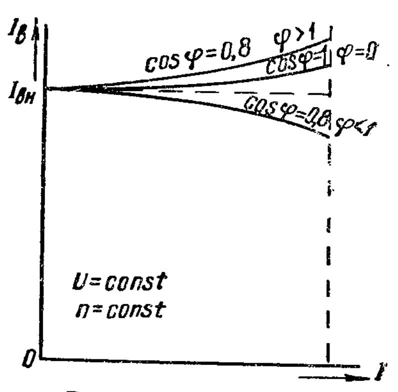



Рис. 118. Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика показывает зависимость тока возбуждения от нагрузки, т. е. $I_в=f(I)$, при скорости вращения $n$=const, напряжении $U$=const и коэффициенте мощности cos φ=const.

При эксплуатации генератора важно поддерживать напряжение на его зажимах неизменным. Этого можно достигнуть за счет регулирования величины тока в цепи возбуждения.

Регулировочные характеристики позволяют определить пределы изменения тока возбуждения. Как видно из характеристик (рис. 118), при активной и индуктивной нагрузках при росте нагрузок необходимо увеличивать ток возбуждения, а при емкостной нагрузке, наоборот, его следует уменьшать.

Регулирование тока возбуждения у синхронных генераторов может производиться двумя реостатами, включенными один последовательно с обмоткой возбуждения самого генератора и другой последовательно с обмоткой возбуждения возбудителя. Первым реостатом непосредственно регулируется поток возбуждения генератора.

Регулирование напряжения приходится производить в широких пределах, и реостаты, включаемые в цепь возбуждения генератора, должны иметь широкий диапазон регулирования. У мощных генераторов ток возбуждения достаточно велик и реостаты получаются довольно громоздкими. Поэтому вводится второй реостат в цепь возбуждения возбудителя, ток возбуждения которого незначителен. Этот реостат является основным и он рассчитывается на весь диапазон регулирования. Реостат в цепи возбуждения генератора в данном случае служит для дополнительного регулирования напряжения генератора в незначительных пределах.

## § 50. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

В синхронных машинах так же, как и в машинах постоянного тока, имеются: электрические (потери в меди), магнитные (потери в стали), механические (потери на трение) и добавочные потери.

На рис. 119 приведена энергетическая диаграмма синхронного генератора. Часть мощности первичного двигателя $P_1$, подводимой к генератору, затрачивается на покрытие механических потерь $P_{мех}$, потерь в стали $P_{ст}$ и потерь на возбуждение $P_в$. Мощность, получающаяся за вычетом перечисленных потерь, является электромагнитной мощностью $P_{эм}$. Она передается на статор в результате взаимодействия основного магнитного потока с токами в статоре, т. е. электромагнитным путем. Полезная мощность $P_2$ получается в результате вычитания из электромагнитной мощности $P_{эм}$ потерь в меди $P_м$, возникающих в обмотке статора при работе машины под нагрузкой. Потери в меди у машин средней и большой мощности составляют менее 1% и практически ими можно пренебречь. Тогда $P_2 \approx P_{эм}$. При этом полезная мощность синхронного генератора определится по формуле

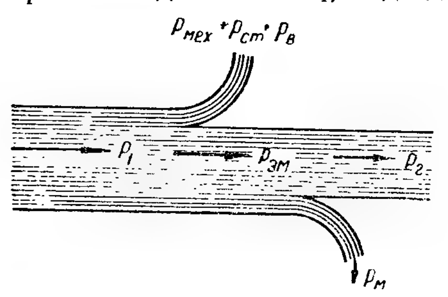


Рис. 119. Энергетическая диаграмма

$$P_{эм} = mUI\cos\varphi, \qquad (121)$$

где $m$ — число фаз в статоре.

Для составления уравнения электромагнитной мощности $P_{эм}$ воспользуемся преобразованной диаграммой э. д. с. (см. рис. 114).

Согласно этой диаграмме $\varphi = \psi - \theta$, где $\varphi$ — угол сдвига фаз между током $I$ и напряжением $U$, а $\psi$ — угол сдвига фаз между током $I$ и э. д. с. $E_0$. Отсюда

$$P_{эм} = mUI\cos(\psi - \Theta) = mUI\cos\psi\cos\Theta + mUI\sin\psi\sin\Theta.$$

В то же время

$$a)\ U\cos\Theta = Of = E_0 - I_d x_d = E_0 - I\sin\psi x_d,$$

откуда

$$I\sin\psi = \frac{E_0 - U\cos\Theta}{x_d};$$

$$б)\ U\sin\Theta = af = I\cos\psi x_q,$$

откуда

$$I\cos\psi = \frac{U\sin\Theta}{x_q}.$$

Подставляя значения $I\sin\psi$ и $I\cos\psi$ в формулу электромагнитной мощности, получаем

$$P_{эм} = m\frac{E_0 U}{x_d}\sin\Theta + m\frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\Theta = P_{эм_0} + P_{эм_д}. \quad (122)$$

Отсюда следует, что электромагнитная мощность синхронного генератора складывается из основной $P_{эм_0}$ и добавочной $P_{эм_д}$ электромагнитных мощностей.

У синхронных машин с неявно выраженными полюсами $P_{эм_д} = 0$ (см. стр. 165).

Таким образом, для этих машин

$$P_{эм} = P_{эм_0} = m\frac{E_0 U}{x_d}\sin\Theta. \quad (123)$$

Электромагнитная мощность $P_{эм}$ прямо пропорциональна моменту $M$, так как $P_{эм} = \omega M$, а скорость вращения машины постоянна и равна $n = \frac{f\,60}{p}$. Угловая скорость равна $\omega = 2\pi\frac{pn}{60}$.

Так как момент равен $M = \frac{P_{эм}}{\omega}$, можно написать

$$M_{эм} = \frac{m}{\omega}\cdot\frac{E_0 U}{x_d}\sin\Theta. \quad (124)$$

В этой формуле множитель $\frac{m}{\omega}\cdot\frac{E_0 U}{x_d}$ — величина постоянная и может быть обозначена коэффициентом $c$. Тогда

$$M_{эм} = c\sin\Theta. \quad (124a)$$

Таким образом, момент и мощность синхронной машины изменяются только в зависимости от угла $\theta$ и пропорциональны $\sin\theta$.

Расчет потерь производится по тем же формулам, что и для машин постоянного тока (см. § 39) с той только разницей, что в формулах потерь в меди вместо омического сопротивления должно быть принято активное сопротивление фазных обмоток статора и омическое сопротивление обмоток возбуждения.

У быстроходных синхронных генераторов значительно возрастают механические потери за счет увеличения потерь от трения о воздух $[P_{мех}=f(n)]$. Они достигают 50—60% всех потерь.

Добавочные потери складываются из потерь от вихревых токов в меди обмотки статора и потерь в стали статора и ротора из-за высших гармонических м. д. с. статора и ротора, а также зубцовых гармоник статора и ротора. Согласно ГОСТу 183—55 эти потери принимаются равными в машинах мощностью до 100 *ква* (включительно) 0,5% номинальной мощности машины.

К. п. д. синхронных машин определяется по формулам:

а) генераторов

$$\eta=\frac{P_{эм}}{P_1}100=\frac{P_{эм}}{P_{эм}+\Sigma P}100\ [\%]; \qquad (125)$$

б) двигателей

$$\eta=\frac{P_2}{P_{эм}}100=\frac{P_{эм}-\Sigma P}{P_{эм}}100\ [\%], \qquad (126)$$

где:

$P_{эм}$ — электромагнитная мощность, подводимая из сети $P_{эм}=mUI\cos\varphi$ в *квт*;

$P_2$ — механическая мощность на валу $\left(P_2=\frac{Mn}{975}\right)$ в *квт*;

$\Sigma P$ — суммарная мощность потерь в *квт*.

У мощных синхронных генераторов к. п. д. достигает 96—99%.

В синхронных машинах небольшой мощности (от 20 до 100 *ква*) к. п. д. лежит обычно в пределах 85—90%.

## § 51. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

**Включение генераторов на параллельную работу.** Синхронные генераторы так же, как и генераторы постоянного тока, могут включаться на параллельную работу (рис. 120), что позволяет более плотно использовать мощность работающих генераторов. Включение синхронных генераторов на параллельную работу обладает некоторыми особенностями. Если для ввода генераторов постоянного тока в параллельную работу достаточно уравнять э. д. с. генератора и напряжение на шинах станции, то для генераторов переменного тока необходимо еще, чтобы их переменная э.д.с. в любой момент времени была равна напряжению на шинах и направлена навстречу ему. Для этого требуется, чтобы частота э. д. с. генератора была в точности равна частоте напряжения сети, а вектор э. д. с. был сдвинут относительно вектора напряжения сети на 180°.

Если будет нарушено первое условие, т. е. э. д. с. генератора, вводимого в параллельную работу, не будет равна напряжению на шинах $E_0 \neq U_c$, то между обмотками обоих генераторов возникнет разностная э.д.с. $\Delta E=U_c-E_0$, совпадающая по фазе с напряжением $U_c$. Эта разностная э. д. с. создаст уравнительный

ток $I_{yp}$, который по фазе будет отставать от разностной э. д. с. на 90°. По отношению к генератору с большей э. д. с. уравнительный ток является индуктивным и будет создавать в нем продольно-размагничивающую м. д. с. реакции якоря, уменьшая его э. д. с. По отношению к генератору с меньшей э. д. с. ток $I_{yp}$ является емкостным и будет создавать в нем продольно-намагничивающую

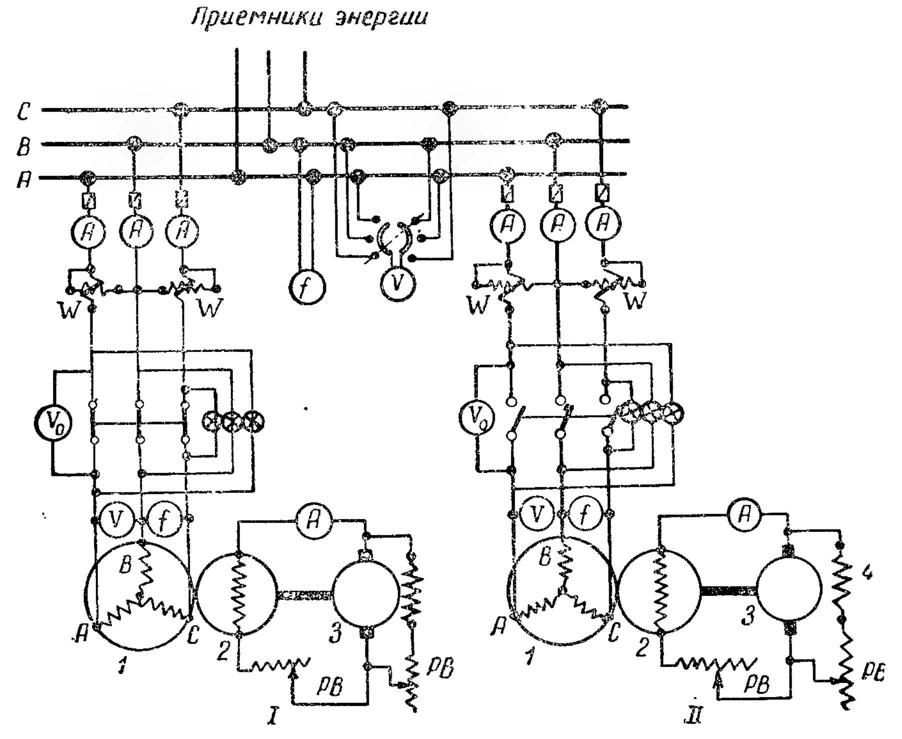



Рис. 120. Параллельная работа синхронных генераторов:
1—статоры генераторов; 2—роторы генераторов; 3—якори возбудителей; 4—обмотки возбуждения возбудителей

м. д. с. реакции якоря, увеличивая его э. д. с. Таким образом уравнительный ток стремится уравнять э. д. с. обоих генераторов. Являясь реактивным, ток $I_{yp}$ не нагружает первичные двигатели, но в первоначальный момент включения генератора может вызвать на валу двигателя значительные механические усилия.

Если же будет нарушено второе условие и частоты работающего и включаемого на параллельную работу генераторов не будут равны $f_2 \neq f_1$, то возникнут биения напряжения в пределах от 0 до $2U$, которые вызовут соответствующие биения тока. Эти биения тока могут вызвать на валу первичного двигателя ощутимые механические усилия в виде толчков. Явления, имеющие место в рассматриваемом случае, могут быть представлены в виде диаграммы

(рис. 121). Так как частоты обоих генераторов не равны, то векторы $U_c$ и $E_0$ будут вращаться с различной угловой скоростью, вектор вводимого генератора $E_0$ — со скоростью $\omega_2 = 2\pi f_2$, а вектор работающего генератора $U_c$ — со скоростью $\omega_1 = 2\pi f_1$.

Если в какой-то момент времени векторы $U_c$ и $E_0$ расположатся по отношению друг к другу так, как показано на диаграмме, то разностная э. д. с. $\Delta E$ будет равна геометрической сумме обеих э. д. с. Под действием разностной э. д. с. в цепи статоров генераторов возникнет ток биений, который по фазе будет отставать от $\Delta E$ на 90° и почти совпадет с э. д. с. $E_0$. Отсюда следует, что ток биений $I_б$ имеет активную слагающую и нагружает генератор, что сказывается на работе первичных двигателей.

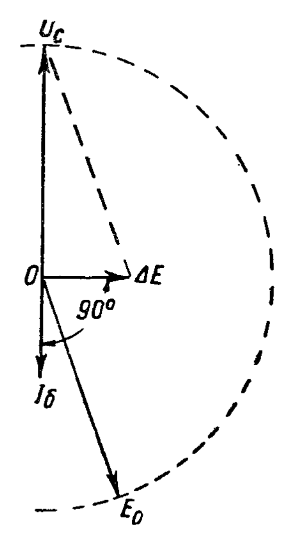


Рис. 121. Биения при $\omega_2 \neq \omega_1$

Включение синхронных генераторов на параллельную работу необходимо производить при соблюдении следующих условий:

1) равенства мгновенных значений э. д. с. генератора и напряжения сети;

2) равенства частот э. д. с. генератора и напряжения на шинах;

3) совпадения по фазе э. д. с. генератора и напряжения на шинах при взаимно противоположном направлении их;

4) одинаковый порядок следования фаз у включаемого генератора и работающих генераторов (рис. 122).

Обеспечение перечисленных условий называется синхронизацией генераторов.

Соблюдение условий синхронизации в процессе ввода генератора в параллельную работу проверяют следующим образом.

Равенство э. д. с. генератора (напряжения на его зажимах при холостом ходе $E_0 = U_0$) и напряжения на шинах станции устанавливается по вольтметрам. Регулировка э. д. с. генератора производится путем изменения его тока возбуждения при помощи реостата возбуждения.

Равенство частот, совпадение $E_0$ и $U_C$ (напряжение сети) и чередование фаз проверяют посредством фазных ламп, подключаемых к ножам рубильника (рис. 123, *а*) во все три фазы генератора.

Различают две схемы включения ламп: «на потухание» (рис. 122, *б*) и «на вращение света» (рис. 122, *в*).

На рис. 122, *б* показаны звезда векторов э. д. с. трехфазного генератора, вводимого в параллельную работу $\overline{E}_A$, $\overline{E}_B$, $\overline{E}_C$, и звезда векторов напряжения $\overline{U}_A$, $\overline{U}_B$, $\overline{U}_C$ на шинах станции.

Если частоты, э. д. с. и напряжения одинаковы, то звезды векторов будут вращаться с одинаковыми угловыми скоростями и относительно друг друга будут оставаться неподвижными. При соблюдении условия совпадения фаз их векторы будут совпадать друг с другом.

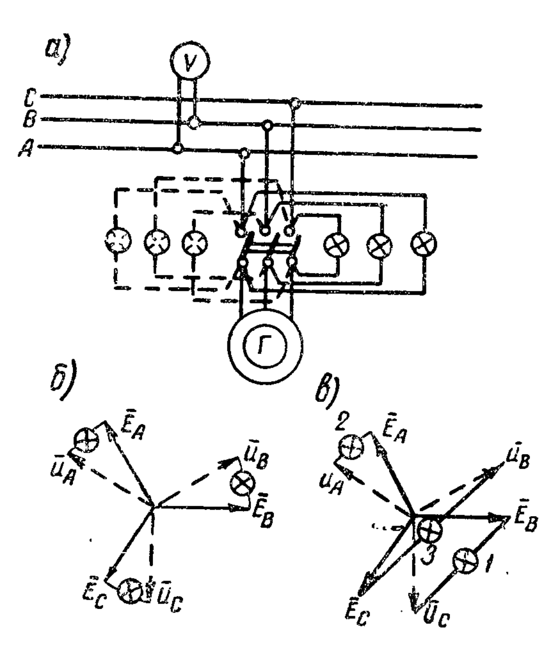



Рис. 122. Включение ламп для проверки синхронизации и порядка чередования фаз

Если же частоты разные (хотя бы э. д. с. и напряжения были равны по величине), то одна звезда векторов будет вращаться быстрее другой. В этом случае мгновенные значение э. д. с. и напряжения не будут равны между собой и на лампах возникнут напряжения, равные разности мгновенных значений э. д. с. и напряжений. Величина действующих значений напряжений на лампе будет равна геометрической разности между соответствующими векторами

$$\overline{U}_A-\overline{E}_A=\Delta\overline{U}_A;\quad \overline{U}_B-\overline{E}_B=\Delta\overline{U}_B;\quad \overline{U}_C-\overline{E}_C=\Delta\overline{U}_C.$$

Лампы будут периодически зажигаться и гаснуть в те моменты, когда звезды векторов будут совпадать друг с другом. Частота мигания ламп пропорциональна разности между угловыми скоростями вращения обеих векторных звезд, т. е. пропорциональна разности частот напряжений вводимого и работающих генераторов. Полное совпадение частот практически получить очень трудно.

Поэтому, регулируя скорость вращения первичного двигателя, добиваются такого положения, при котором период потухания ламп достигает 4—5 сек., после чего процесс подготовки генератора к включению считают законченным. Включать рубильник следует в тот момент, когда погаснут лампы.

На рис. 122,*а* (пунктиром) и на векторной диаграмме, приведенной на рис. 122, *в*, показан способ включения ламп «на вращение света».

Представим себе, что обе звезды векторов вращаются против часовой стрелки, при этом звезда $E_A E_B E_C$ вращается быстрее. Тогда загорится полным светом раньше других лампа *1*, затем —

лампа 2, и, наконец, лампа 3. Расположив три лампы по кругу, получим вращение света. Направление его вращения будет зависеть от того, какая звезда векторов вращается быстрее.

Очень важно при синхронизации установить правильность чередования фаз у генератора.

Если при включении ламп по описанным схемам получается ожидаемый световой эффект, значит чередование фаз у сети и включаемого генератора одинаковое. Если же при включении ламп «на потухание» получается вращение света или, наоборот, при включении ламп «на вращение света» получается потухание, то чередование фаз неодинаковое. В этом случае достаточно переменить местами любые два провода, идущие от генератора к рубильнику. Включение генератора можно производить только после того, как будет согласован порядок чередования фаз.

Описанные способы синхронизации генераторов довольно сложны. Поэтому в последнее время начинают осуществлять ввод генераторов в параллельную работу по способу самосинхронизации. При этом способе вводимый генератор приводят во вращение со скоростью, отличающейся от синхронной на ±(2—3%), и включают в сеть без возбуждения. Во избежание перенапряжения обмотка ротора генератора должна быть при этом замкнута накоротко. После того как генератор приведен во вращение с заданной скоростью, его возбуждают и он сам впадает в синхронизм. В первый момент включения разностная э. д. с. будет равна напряжению сети $\Delta E = U_C$. Толчок тока будет превышать номинальный ток в несколько раз и на валу генератора возникнут некоторые механические усилия, величина которых обычно не представляет опасности для машины.

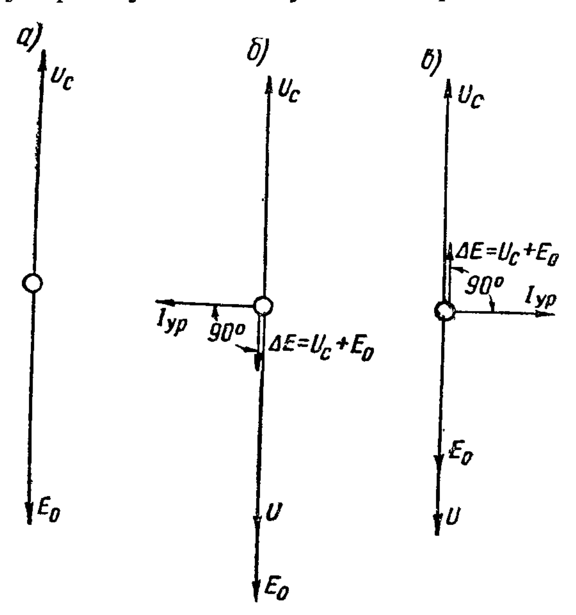



Рис. 123. Векторная диаграмма синхронного генератора при отсутствии активной нагрузки

**Изменение возбуждения.** Рассмотрим параллельную работу генератора с сетью бесконечно большой мощности при изменении тока в его обмотке возбуждения. Если генератор работает в ре-

жиме холостого хода, вектор его э. д. с. $E_0$ уравновешивает напряжение сети $U_C$ и тока в статоре не будет (рис. 123, *а*).

В том случае, если увеличить ток возбуждения (перевозбудить машину), напряжение сети не будет уравновешивать э. д. с. машины и появится разностная э. д. с. $\Delta\bar{E}=\bar{U}_C+\bar{E}_0$ (рис. 123, *б*). Эта э. д. с. создаст ток, который будет протекать по обмоткам всех параллельно работающих машин. Пренебрегая их сопротивлением, а также активным сопротивлением рассматриваемого генератора, можно считать, что величина возникшего уравнительного тока будет равна

$$I_{ур}=\frac{\Delta E}{x_d}. \qquad (127)$$

Это реактивный ток, который отстает от $\Delta\bar{E}$ и $\bar{U}$ на 90°.

При уменьшении тока возбуждения (при недовозбуждении) напряжение сети $U_c$ будет больше э. д. с. $E_0$ и $\Delta E$ (рис. 123, *в*) создаст опережающий ток

$$I_{ур}=\frac{\Delta E}{x_d}.$$

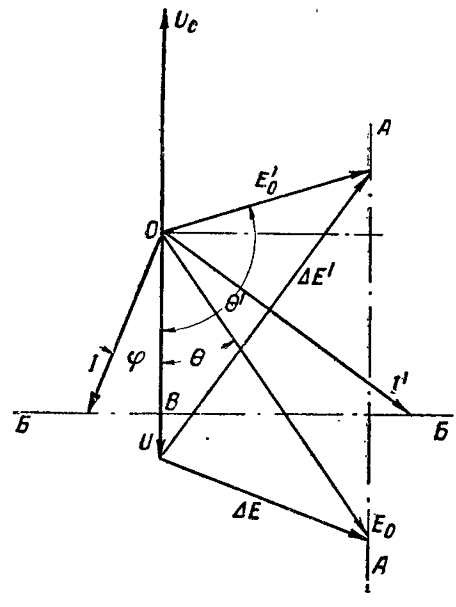



Рис. 124. Векторная диаграмма синхронного генератора при изменении возбуждения

На рис. 124 представлена диаграмма генератора, работающего с постоянной мощностью $P_1 \approx P_{эм}=\text{const}$.

В § 50 было получено выражение для электромагнитной мощности [формула (123)]

$$P_{эм}=m\frac{E_0U}{x_d}\sin\theta.$$

Из этого выражения следует, что если $m$, $U$ и $x_d$ являются постоянными величинами, то для $P_{эм}=\text{const}$ произведение $E_0\sin\theta$ тоже должно быть постоянной величиной. При изменении тока возбуждения будет меняться величина $E_0$, но конец вектора $E_0$ всегда будет перемещаться по прямой, параллельной вектору напряжения $U$. При этом проекция $E_0$ на перпендикулярную прямую ББ, соответствующая произведению $E_0\sin\theta$, при всех изменениях тока возбуждения будет равна отрезку *ОГ*.

На этой диаграмме видно, что векторы токов при всех изменениях $E_0$ будут перпендикулярны разностной э. д. с. $\Delta E$, отставая при этом от нее. Сдвиг тока относительно напряжения $U$ на зажи-

max генератора определяется углом $\varphi$, который может быть больше или меньше нуля.

Возьмем второе выражение для электромагнитной мощности [формула (121)]

$$P_{эм}=mUI\cos\varphi$$

Из этого выражения видно, что для $P_{эм}$=const при $m$=const и $U$=const произведение $I\cos\varphi$ тоже должно быть постоянной величиной. А это ни что иное как проекция векторов токов на направление вектора $\overline{U}$. Следовательно, при всех изменениях тока конец вектора $\overline{I}$ будет перемещаться по прямой, перпендикулярной к вектору $U$, и величина проекций $I\cos\varphi$ будет равна отрезку $OB$.

Таким образом видно, что изменение возбуждения вызывает лишь изменение реактивной составляющей тока. Активная составляющая тока, определяющая собой активную мощность, остается постоянной. С помощью данной диаграммы можно найти зависимость тока $I$ статора от э. д. с. $E_0$. По найденным значениям $E_0$, используя характеристику холостого хода, можно найти соответственные значения токов $I_в$ возбуждения.

Этим способом можно найти функциональную зависимость $I=f(I_в)$ при $P_{эм}$=const и $U$=const. Кривые, выражающие эту зависимость, называются $U$-образными (рис. 125).

Эти кривые позволяют определить минимальный ток возбуждения исходя из того, чтобы при заданной мощности по обмоткам статора протекал наименьший ток (при $\cos\varphi=1$).

**Изменение активной нагрузки машины.** Для изменения активной нагрузки машины необходимо изменить момент вращения на валу, воздействуя на первичный двигатель.

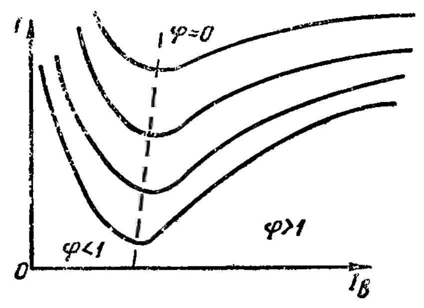



Рис. 125. U-образные кривые

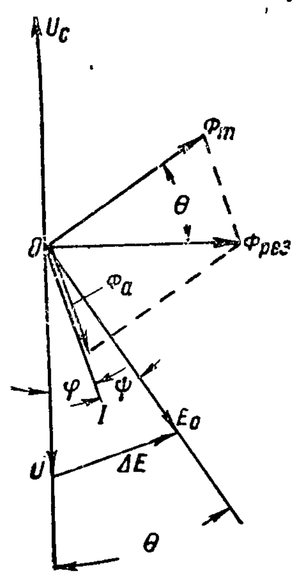



Рис. 126. Векторная диаграмма синхронного генератора при появлении вращающего момента на валу

На рис. 126 рассматривается случай, когда на валу синхронного генератора, работающего вхолостую, появляется вращающий

момент со стороны первичного двигателя. Ток возбуждения при этом остается неизменным. В данном случае появится разностная э. д. с. $\Delta E$ и вызванный ею ток создаст поле реакции якоря.

Результирующее поле выражается вектором $\Phi_{рез}$, который получается в результате сложения векторов $\Phi_m$ основного потока и $\Phi_a$ потока реакции якоря. Э. д. с. $E_0$ вызывается потоком $\Phi_m$. Векторы $E_0$ и $\Phi_m$, а также $U$ и $\Phi_{рез}$ взаимно перпендикулярны друг другу. Отсюда угол между $\Phi_m$ и $\Phi_{рез}$ равен углу $\theta$ между $E_0$ и $U$.

Процесс распределения нагрузки между двумя параллельно работающими генераторами изображен на векторной диаграмме (рис. 127).

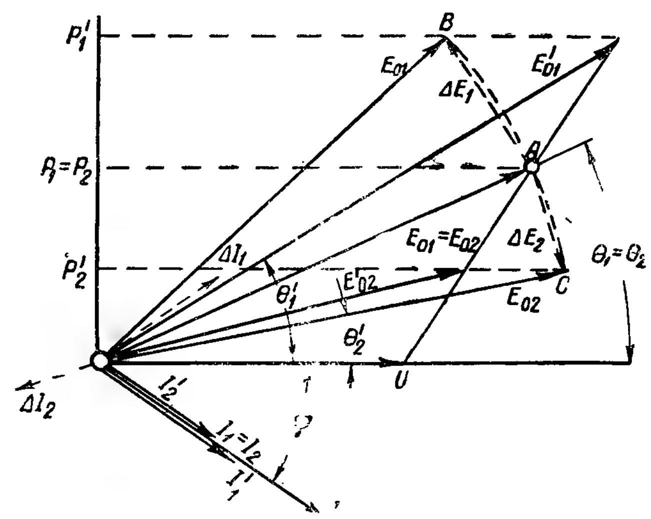



Рис. 127. Векторная диаграмма распределения нагрузок между параллельно работающими генераторами

Допустим, что вначале генераторы имеют одинаковые э. д. с. и токи ($E_{01}=E_{02}$ и $I_1=I_2$).

Увеличим вращающий момент на валу первого генератора. В этом случае появится разностная э. д. с. $\Delta E_1$ и вызванный ею ток $\Delta I_1=I_{ур1}$, который изменит поле реакции якоря, имевшееся ранее.

Следовательно увеличится угол $\theta_1$ между векторами $\overline{E_{01}}$ и $\overline{U}$. Конец вектора $E_{01}$ переместится в точку $B$. Что касается до тока, то он возрастет за счет уравнительного тока $I_{ур1}$ вызванного разностной э. д. с. $\Delta E_1$ до величины $I_1'=I_1+I_{ур1}$ (на рис. 127 $I_1'$ и $I_2'$ показаны для окончательного значения).

Если желательно, чтобы суммарная нагрузка на оба генератора осталась неизменной, то второй генератор надо разгрузить. Для этого следует уменьшить вращающий момент на валу второго генератора. Это приведет к тому, что на диаграмме конец век-

тора $\overline{E}_{02}$ переместится в точку $C$. $\Delta E_2$ создаст $\Delta I_2 = I_{yp2}$. При этом косинусы $\varphi$ обоих токов станут различными, так как векторы разностных э. д. с. $\Delta\overline{E}_1$ и $\Delta\overline{E}_2$ не будут находиться на одной прямой и, следовательно, векторы токов $\overline{I}_{yp1}$ и $\overline{I}_{yp2}$ тоже не будут на одной прямой.

Чтобы сохранить одинаковыми косинусы $\varphi$, необходимо изменить также и токи возбуждения генераторов. Для этого увеличивают ток $I_{в1}$, чтобы увеличить $E_{01}$ до $E'_{01}$, а ток $I_{в2}$ уменьшают, чтобы уменьшить $E_{02}$ до $E'_{02}$. Возбуждение меняется с таким расчетом, чтобы концы векторов $\overline{E}'_{01}$ и $\overline{E}'_{02}$ лежали на прямой, перпендикулярной вектору первоначального тока $I$ и проходящей через начальную точку $A$. Следует обратить внимание на то, что при изменении возбуждения концы векторов $\overline{E}_{01}$ и $\overline{E}_{02}$ перемещаются по прямым, параллельным вектору $\overline{U}$ (в соответствии с рис. 124).

Так как векторы уравнительных токов $\overline{I}_{yp1}$ и $\overline{I}_{yp2}$ перпендикулярны векторам разностных э. д. с. $\Delta\overline{E}_1$ и $\Delta\overline{E}_2$, то теперь они будут лежать на той же прямой, на которой расположены начальные токи $I_1$ и $I_2$.

Следовательно, конечные значения токов будут представлять арифметические сумму и разность: $I_1' = I_1 + I'_{yp1}$ и $I_2' = I_2 - I'_{yp2}$, а фазный угол для обоих токов не изменится.

Большое значение для работы синхронных машин имеет вопрос устойчивости их работы. Работа синхронной машины будет устойчивой, если положительному приращению $\Delta\Theta$ соответствует положительное приращение электромагнитной мощности $\Delta P_{эм}$ и, наоборот, уменьшению угла $\Delta\Theta$ будет соответствовать уменьшение электромагнитной мощности $\Delta P_{эм}$.

В этом случае $\frac{\Delta P_{эм}}{\Delta\Theta}$ можно рассматривать и при бесконечно малых изменениях, а тем самым перейти к первой производной $\frac{dP_{эм}}{d\Theta}$.

Тогда

$$P_c = \frac{dP_{эм}}{d\Theta} = m\frac{E_0 U}{x_c}\cos\Theta. \qquad (128)$$

Мощность $P_c$ называется **удельной синхронизирующей мощностью**. Из самой дроби следует, что эта величина измеряется в $\frac{вт}{рад}$ (мощность на единицу смещения). Синхронизирующая мощность равна удельной синхронизирующей мощности, умноженной на все смещение $\Delta\Theta$

$$P_{cx} = P_c\Delta\Theta. \qquad (129)$$

Электромагнитный момент в синхронной машине действует всегда так, чтобы угол $\Theta$ уменьшился и ось полюсов совпала с осью поля.

Из выражений $P_{cx}$ и $P_{эм}$ следует, что когда угол $\Theta = 0$, генератор развивает наибольшую синхронизирующую мощность, но

его электромагнитная мощность $P_{эм}$=0. Наоборот, когда угол $\Theta=90^0$, генератор развивает наибольшую электромагнитную мощность, а его синхронизирующая мощность $P_{сх}$=0.

Практически угол $\Theta$ у работающих генераторов не превышает 25°.

Регулировать вращающий момент первичного двигателя можно, увеличивая или уменьшая сообщаемый ему запас энергии, например, увеличивая расход воды или пара у гидравлических или паровых турбин.

В соответствии с Правилами Речного Регистра СССР при параллельной работе синхронных генераторов на главном распределительном щите (сокращенно ГРЩ) судовой электрической станции для каждого генератора должна быть выделена самостоятельная панель. На генераторной панели ГРЩ должна быть установлена следующая аппаратура и приборы:

а) при независимой работе одного или нескольких генераторов на панели каждого генератора устанавливаются: трехполюсный автоматический выключатель с реле максимального тока с выдержкой времени (на двух фазах), амперметры (на каждую фазу), вольтметр с переключателем;

б) при параллельной работе нескольких генераторов на панели каждого генератора устанавливаются: трехполюсный автоматический выключатель с реле максимального тока и обратной мощности, амперметры (на каждой фазе), вольтметр с переключателем.

Кроме того, на главном распределительном щите электрической станции переменного тока для всей установки должны быть: частотомер, фазометр, ваттметр, а при параллельной работе генераторов еще и синхронизирующее устройство.

Общий порядок ввода в параллельную работу синхронного генератора следующий:

1) сообщают генератору номинальное число оборотов;

2) возбуждают генератор и создают на его зажимах напряжение, равное напряжению на шинах станции;

3) уравнивают при помощи синхронизирующих ламп частоту напряжения на его зажимах с частотой напряжения на шинах станции; проверяют совпадение и порядок чередования фаз;

4) включают генератор на шины станции;

5) регулируя вращающие моменты первичных двигателей и токи возбуждения, перераспределяют активную и реактивную нагрузку между вводимым и работающими генераторами.

При отключении генератора последовательность операций обратная. Снижают мощность первичного двигателя и тем самым доводят активную нагрузку генератора до нуля. Затем, уменьшая ток возбуждения, снимают с генератора реактивную нагрузку. Когда ток генератора упадет до нуля и $E_0=-U_c$, генератор отключают от сети, выключают его обмотку возбуждения и останавливают первичный двигатель.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На каком принципе основана работа синхронных машин?
2. Какая связь существует между частотой и числом оборотов синхронных машин?
3. Из каких основных частей состоит синхронный генератор и каково их устройство?
4. Какие применяются способы возбуждения синхронных генераторов?
5. В чем заключается особенность возбуждения генератора по способу С. Б. Юдицкого?
6. Каковы недостатки синхронных генераторов с вращающимся якорем?
7. При каком числе оборотов и почему применяются роторы с неявно выраженными полюсами?
8. Как устроен ротор с неявновыраженными полюсами?
9. Какие применяются обмотки статора генератора?
10. Как определяется число пазов обмотки статора на полюс и фазу?
11. Какие требования предъявляются к форме кривой э.д.с.?
12. Как выполняются лобовые части обмоток статора трехфазного генератора?
13. Чему равна э.д.с. одной фазы обмотки статора генератора?
14. Как действует реакция якоря на работу синхронного генератора?
15. Как изменяется магнитное поле машины при индуктивной и емкостной нагрузках?
16. Как строится диаграмма э.д.с. синхронного генератора?
17. Какие характеристики определяют работу синхронного генератора и каковы их особенности?
18. Чему равен к.п.д. синхронного генератора?
19. Каковы условия параллельной работы синхронных генераторов?
20. Как производится синхронизация генератора?

# *Глава VII*
# СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

## § 52. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При работе машины двигателем вращающееся магнитное поле статора увлекает за собой полюсы ротора и машина приходит во вращение.

Если у одного из параллельно работающих генераторов отключить первичный двигатель, то он будет продолжать вращаться синхронно в силу того, что статор и ротор по-прежнему будут упруго сцеплены между собой магнитными силовыми линиями в воздушном зазоре, создающими силу магнитного тяжения. В данном случае мощность будет подводиться из сети и создаваемый ею магнитный поток будет ведущим, а поток ротора — ведомым. При работе машины в режиме двигателя ось потока статора будет опережать ось потока ротора на угол $\Theta$, соответственно и вектор напряжения сети $U_c$ будет опережать свою составляющую — $E_0$ на угол $\Theta$.

Векторная диаграмма синхронного двигателя дана на рис. 128. При построении диаграммы условно принято, что заданы подводимое к двигателю напряжение $\overline{U}_c$, которое уравновешивается суммой обратных э. д. с. $\Sigma E_{\partial}$, ток $I$, $\cos\varphi$ ($\varphi>0$) и параметр $x_{cx}$.

Для неявнополюсных и ненасыщенных машин $x_{cx} = x_d = x_q$ (см. стр. 165).

Вектор тока $\bar{I}$ откладываем вверх по оси ординат и под углом $\varphi$ к нему проводим вектор напряжения $U_c$. На основании известного сопротивления $x_{cx}$ может быть построен вектор э. д. с. $\bar{E}_{cx}=I\bar{x}_{cx}$, создаваемый потоком якоря. Вектор $E_0$ определится как третья сторона треугольника, одним катетом которого является вектор $\bar{E}_{cx}$, а гипотенузой — вектор $\Sigma\bar{E}_д$.

Эта же диаграмма может быть построена относительно составляющих напряжения, которые уравновешивают соответствующие э. д. с. В данном случае вектор $OA$ является составляющей напряжения, уравновешивающей э. д. с. $\bar{E}_0$, а вектор $AB = Ix_{cx}$ — составляющей напряжения, уравновешивающей э. д. с. реакции якоря и э. д. с. рассеяния.

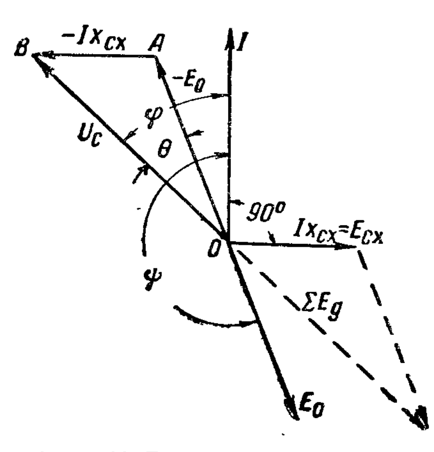



Рис. 128. Векторная диаграмма синхронного двигателя

Для уяснения процесса передачи мощности в синхронной машине рассмотрим взаимодействие ее статора и ротора.

Магнитная система машины показана в развернутом виде на рис. 129.

Когда полюсы полей статора и ротора расположены по одной оси, силы взаимодействия между ними направлены радиально, поэтому тангенциальные силы и момент вращения машин равны нулю. Активная мощность не может быть передана ни от ротора к статору, ни от статора к ротору. Но если полюсы ротора опережают полюсы статора на некоторый угол $\Theta$, то между ротором и статором появляются тангенциальные силы взаимодействия и развивается некоторый вращающий момент.

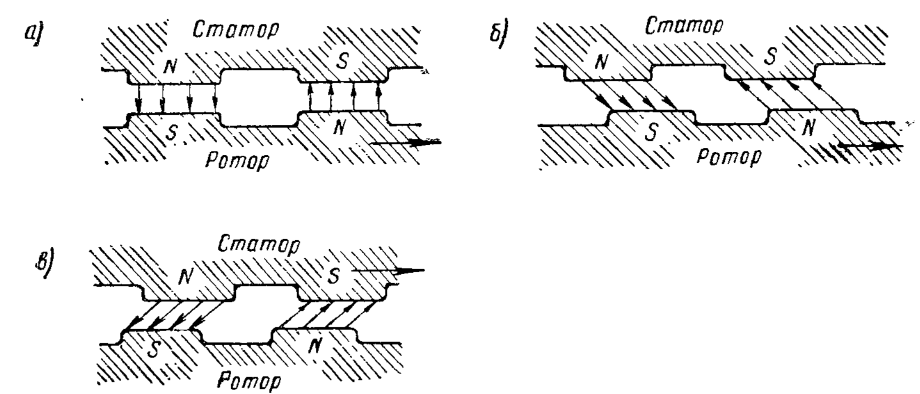



Рис. 129. Потоки сцепления статора и ротора

В режиме генератора поле ротора опережает поле статора и происходит передача активной мощности от ротора к статору, при работе машины двигателем наоборот поле статора опережает поле ротора и передача активной мощности происходит от статора к ротору.

## § 53. МОМЕНТ ВРАЩЕНИЯ И МОЩНОСТЬ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Основная диаграмма э. д. с. синхронного двигателя аналогична основной диаграмме э. д. с. синхронного генератора.

Поэтому уравнение электромагнитной мощности $P_{эм}$ синхронного двигателя будет таким же, как и для генератора с той лишь разницей, что угол $\Theta$ для двигателя надо считать отрицательным. Машина в данном случае не отдает энергию в сеть, а потребляет ее из сети.

В соответствии с этим электромагнитный момент двигателя, прямо пропорциональный электромагнитной мощности $P_{эм}$, является вращающим моментом, который уравновешивает тормозной момент на валу двигателя.

У синхронных двигателей угол $\Theta$ может быть больше, чем у синхронных генераторов и составляет 20—30°, в то же время электромагнитная мощность, пропорциональная $\cos\Theta$, меньше, чем у синхронных генераторов.

## § 54. ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА РАБОТУ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При постоянной нагрузке на валу синхронного двигателя ($P = 3UI\cos\varphi = \text{const}$) с изменением возбуждения двигателя будет изменяться величина э. д. с., наводимой в обмотке статора (рис. 130). При этом концы векторов э.д.с. $\overline{E}_{01}$, $\overline{E}_{02}$, и $\overline{E}_{03}$ будут перемещаться по прямой $AA$, а конец вектора тока — по прямой $ББ$, так как это было уже показано на рис. 124 для генератора.

Когда э. д. с. машины определяется вектором $\overline{E}_{02}$, вектор тока $\overline{I}_2$ совпадает с вектором напряжения $\overline{U}_c$, $\cos\varphi_2 = 1$ и ток имеет наименьшую величину. При увеличении тока возбуждения, а следовательно и э. д. с. до величины $E_{01}$ ($E_{01} > E_{02}$) вектор тока $\overline{I}_1$ опережает вектор напряжения $\overline{U}_c$ на некоторый угол $\varphi_1$, зависящий от величины э. д. с., т. е. образуется отрицательный угол сдвига фаз. Двигатель в этом случае будет являться емкостной нагрузкой и будет отдавать в сеть излишнюю индуктивную мощность, которая может быть использована для намагничивания потребителей индуктивной мощности.

Такой режим работы двигателя называется **перевозбужденным**.

При уменьшении тока возбуждения двигателя его э. д. с. также уменьшается ($E_{03} < E_{02}$) и между вектором тока и вектором на-

пряжения $\overline{U}_c$ создается положительный сдвиг фаз, вектор напряжения $\overline{U}_c$ опережает вектор тока $\overline{I}_3$. Двигатель потребляет из сети индуктивную нагрузку и его режим является недовозбужденным.

Таким образом, воздействуя на величину возбуждения двигателя, можно менять угол сдвига фаз между его векторами тока и напряжения. Двигатель может работать не только с коэффициентом мощности, равным единице ($\cos\varphi=1$), но и отдавать в сеть реактивную индуктивную мощность, способствуя этим повышению общего коэффициента мощности сети.

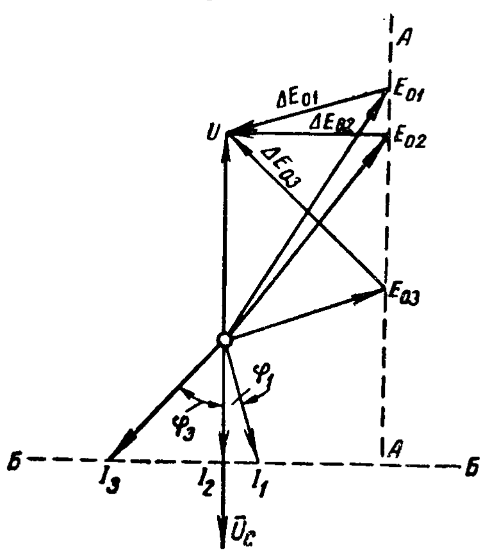



Рис. 130. Векторная диаграмма синхронного двигателя при изменении величины возбуждения

Синхронные двигатели, используемые для этой цели, называются **синхронными компенсаторами.**

## § 55. ПУСК СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Присоединение синхронного двигателя к сети возможно лишь после того, как ротору двигателя будет сообщена скорость вращения, близкая к скорости вращающегося магнитного поля. Это может быть сделано либо при помощи дополнительного двигателя, связанного на время пуска с синхронным двигателем посредством разъемной муфты, либо с использованием специальных электрических схем.

В настоящее время чаще всего применяется асинхронный пуск синхронных двигателей, для чего в пазы полюсных башмаков полюсов ротора двигателя закладывается специальная пусковая обмотка в виде медных стержней, соединенных между собой по торцам. При включении в сеть трехфазной статорной обмотки создается вращающееся магнитное поле, которое, пересекая короткозамкнутые стержни пусковой обмотки, наводит в ней ток. Магнитное поле пусковой обмотки, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора, создает вращающий момент и быстро развивает скорость, близкую к синхронной. После этого включают питание обмотки возбуждения и двигатель втягивается в синхронизм.

Электрическая схема пуска синхронного двигателя дана на рис. 131. В начале пуска обмотка статора включается в сеть через автотрансформатор на пониженное напряжение. Обмотка возбуждения замыкается на сопротивление в 10—15 раз большее

сопротивления самой обмотки. После того как двигатель разовьет обороты, близкие к синхронным, обмотку статора переключают на полное напряжение сети, а обмотку возбуждения — на питание от возбудителя. На схеме показан пуск двигателя вручную, при котором все переключения производятся от руки при помощи

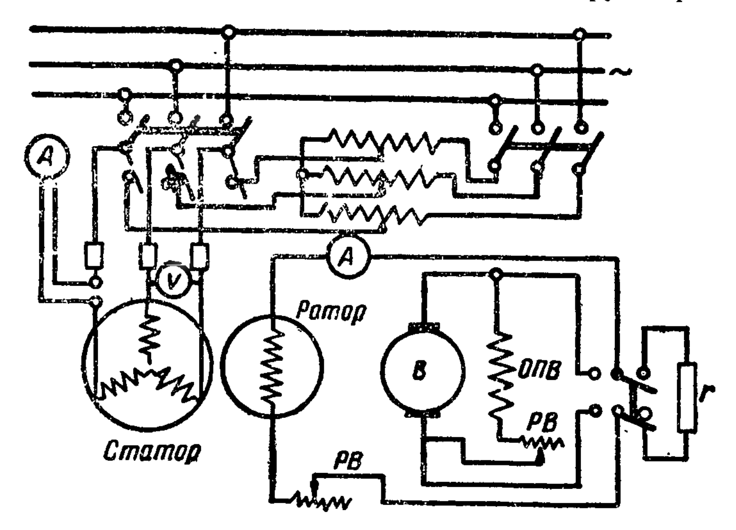



Рис. 131. Схема пуска синхронного двигателя

переключателей. В настоящее время широко осуществляется автоматический пуск двигателей с применением контакторов и реле.

## § 56. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Синхронные двигатели обладают целым рядом особенностей, о которых лучше всего судить по их рабочим характеристикам (рис. 132). Эти характеристики показывают зависимость $I$, $n$, $M$ $M_2$, $\cos\varphi$ и $\eta$ от мощности $P_2$ при $U=\mathrm{const}$ и $f=\mathrm{const}$.

Скорость вращения $n$ не зависит от нагрузки, поэтому она выражается прямой линией, параллельной оси абсцисс.

Вращающий момент складывается из момента холостого хода $M_0$ и полезного тормозного момента $M_2$ и равен

$$M=M_0+M_2.$$

Но так как $M_0=\mathrm{const}$, а $M_2=\frac{P_2}{\omega}$, момент $M$ будет выражаться прямой, не проходящей через начало координат, а $M_2$—прямой, проходящей через начало координат.

Так как ток пропорционален вращающему моменту, то он будет выражаться той же прямой, что и момент $M$. При изменении нагрузки от 0 до $\frac{1}{2}P_н$ кривая к. п. д. быстро возрастает, а затем ее рост прекращается и к. п. д. машины даже понижается.

Изменение $\cos\varphi$ зависит от характера возбуждения двигате-

ля. Если обеспечить номинальное постоянное возбуждение машины при ее работе на холостом ходу, при котором $\cos\varphi=1$, то с увеличением нагрузки получится недовозбужденный режим работы двигателя. При этом возникнут реактивные токи, отстающие от напряжения на угол $\psi$. Наоборот, если установить номинальное постоянное возбуждение двигателя при номинальной нагрузке, то при уменьшении нагрузки двигатель начнет забирать из сети реактивные опережающие токи, а при перегрузке — реактивные отстающие токи. Кривая $\cos\varphi=f(P_2)$ дана для некоторого промежуточного значения тока возбуждения.

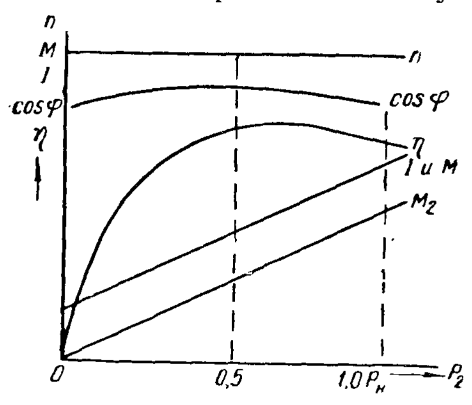



Рис. 132. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Синхронные двигатели применяются главным образом для привода механизмов значительной мощности (свыше 100 *квт*), требующих постоянства числа оборотов.

В судовых условиях они используются в схемах электрических приводов компрессоров, центробежных насосов, а также в схемах генератор-двигатель.

## *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. На каком принципе основана работа синхронных двигателей?
2. Как и при каких условиях в синхронных машинах происходит передача активной мощности от статора к ротору?
3. Как строится векторная диаграмма синхронного двигателя и какие из нее могут быть сделаны выводы?
4. Какое значение имеет для синхронной машины угол сдвига фаз между векторами напряжения холостого хода и э.д.с., создаваемой основным магнитным потоком?
5. Как происходит процесс саморегулирования в синхронных двигателях?
6. Какое влияние оказывает изменение тока возбуждения на работу синхронного двигателя?
7. Почему синхронные двигатели могут быть использованы для улучшения коэффициента мощности электрических установок?
8. Как производят пуск в ход синхронных двигателей?
9. Какую механическую характеристику имеют синхронные двигатели?
10. Где применяются синхронные двигатели?

# *Глава VIII*

# ТРАНСФОРМАТОРЫ

## § 57. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, посредством которого электрическая энергия

одного напряжения преобразуется в электрическую энергию другого, большего или меньшего напряжения.

Впервые принцип трансформации был применен в 1876 г. П. Н. Яблочковым для «дробления света», т. е. раздельного питания нескольких электрических дуг—«свечей Яблочкова» от одной электрической цепи переменного тока. В 1881 г. И. Ф. Усагин разработал конструкцию трансформатора, положившую основу современного трансформаторостроения. М. О. Доливо-Добровольским была разработана в 1891 г. конструкция трехфазного трансформатора.

Трансформаторы имеют огромное значение для распределения и передачи электрической энергии, так как передача этой энергии на большие расстояния возможна лишь при достаточно высоком напряжении и небольшом токе. В противном случае потери мощности на нагревание проводов $I^2r$ были бы слишком большими. Например, передача электрической энергии от Куйбышевской ГЭС в Москву производится при напряжении 400 тыс. *в*. Высокое напряжение 400, 220, 110, 35, 10, 6 и 3 *кв* понижается до напряжения 500, 380, 220 и 127 *в* с помощью трансформаторов. Это стандартные напряжения сетей высокого и сетей низкого напряжения, к которым присоединяются приемники электрической энергии (ГОСТ 721—41).

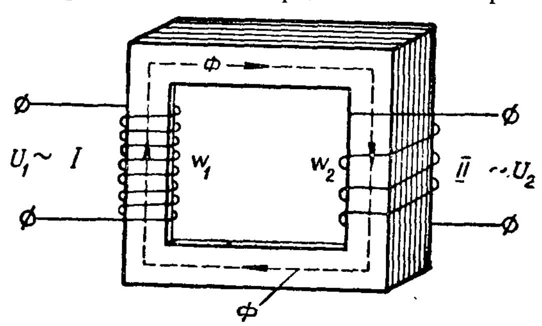



Рис. 133. Принципиальная схема трансформатора

Трансформаторы, у которых напряжение на выходе выше напряжения на входе, называются п о в ы ш а ю щ и м и, а трансформаторы, у которых напряжение на выходе ниже напряжения на входе — п о н и ж а ю щ и м и.

Принцип действия трансформаторов основан на законе электромагнитной индукции.

Трансформатор (рис. 133) представляет собой замкнутый стальной сердечник прямоугольной формы, на котором размещается две или несколько обмоток с различным числом витков, сделанных из медной проволоки или шины.

Обмотка, к которой подводится ток из сети, называется п е р в и ч н о й, а обмотка, в которой наводится э. д. с. взаимоиндукции — в т о р и ч н о й. Если трансформатор повышающий, то его первичная обмотка является обмоткой низшего напряжения (*НН*), а его вторичная обмотка — обмоткой высшего напряжения (*ВН*). У понижающего трансформатора, наоборот, первичная обмотка — высшего напряжения, а вторичная — низшего напряжения.

При прохождении по первичной обмотке переменного тока создается магнитный поток, который почти полностью замыкается в сердечнике трансформатора, лишь незначительная его часть замыкается вокруг первичной обмотки, главным образом в воздухе (это так называемый поток рассеяния).

Основной (намагничивающий) магнитный поток $\Phi$ (в сердечнике) наводит в обеих обмотках э. д. с.; в первичной обмотке — э. д. с. самоиндукции, во вторичной — э. д. с. взаимоиндукции.

Э. д. с., наводимая во вторичной обмотке, когда вторичная цепь замкнута на потребителей, создает в ней ток, передающий энергию потребителям.

Величина э. д. с. самоиндукции равна:

$$e_L = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \ [в], \qquad (130)$$

а величина э. д. с. взаимоиндукции равна:

$$e_м = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \ [в]. \qquad (131)$$

В этих формулах приняты следующие обозначения:

$w_1$ и $w_2$ — число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора;

$\frac{d\Phi}{dt}$ — скорость изменения магнитного потока, где $\Phi$ дан в *вб*.

Так как подводимое переменное напряжение синусоидально, магнитный поток изменяется по закону косинуса (см. стр. 151) и его мгновенное значение равно:

$$\Phi = \Phi_м \cos\omega t = \Phi_м \sin(\omega t + 90°).$$

Отсюда мгновенное значение э. д. с.

$$e_1 = w_1 \Phi_м \omega \sin\omega t.$$

Так как максимальное значение э. д. с. равно $E_м = w_1 \Phi_м \omega$, получаем:

$$e_1 = E_м \sin\omega t.$$

Как видно из данного выражения, наводимая в обмотках трансформатора э. д. с. отстает по фазе от намагничивающего потока на 90° (о чем уже говорилось выше).

Действующее значение э. д. с. первичной обмотки равно:

$$E_1 = w \frac{w_1 \Phi_м \omega}{\sqrt{2}} = \frac{w_1 \Phi_м 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4{,}44 f w_1 \Phi_м, \qquad [в]. \qquad (132)$$

Соответственно для вторичной обмотки

$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_м \qquad [в], \qquad (133)$$

где $\Phi_м$ — амплитудное значение намагничивающего потока в *вб*.

Разделив первое выражение на второе, получаем

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k. \qquad (134)$$

Это отношение называется **коэффициентом трансформации**.

Э. д. с., наводимые в первичной и вторичной обмотках трансформатора, прямо пропорциональны количеству витков обмоток.

## § 58. УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРОВ

Различают трансформаторы стержневого и броневого типов. У трансформаторов стержневого типа обмотки находятся на сердечниках, соединенных верхним и нижним ярмом, замыкающими магнитную цепь (см. рис. 133).

У трансформаторов броневого типа обмотки помещаются на сердечниках, которые частично закрыты разветвленным магнитопроводом (рис. 134).

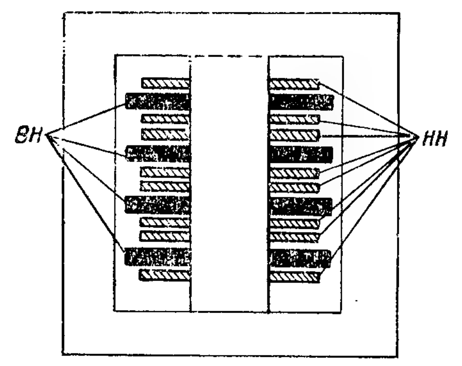


Рис. 134. Трансформатор броневого типа

Трансформатор (рис. 135) состоит из следующих основных частей: магнитопровода, обмоток (первичной и вторичной), выводного устройства и кожуха или бака с расширителем.

**Магнитопровод** в целях уменьшения потерь на вихревые токи собирается в пакеты из отдельных листов трансформаторной стали толщиной 0,35—0,50 *мм*, изолированных друг от друга лаком или бумагой. Магнитопровод состоит из сердечников, верхнего и нижнего ярма, замыкающих магнитную цепь (рис. 136). Листы пакета ярма и сердечника обычно собираются внахлестку, что снижает магнитное сопротивление магнитопровода. Листы спрессовываются и стягиваются стяжными шпильками.

**Обмотки** трансформаторов могут быть концентрические или чередующиеся (рис. 137). Для уменьшения потоков рассеяния первичные и вторичные обмотки трансформаторов по возможности должны быть расположены ближе друг к другу.

При концентрических обмотках одна обмотка располагается поверх другой, причем снаружи помещается обмотка высшего напряжения, так как обмотку низшего напряжения легче изолировать от заземленного сердечника (стержня).

При чередующейся обмотке первичная и вторичная обмотки разбиваются на ряд плоских секций, которые, чередуясь между собой, насаживаются на сердечник. Концентрические обмотки

высшего и низшего напряжения отделяются друг от друга изолирующими цилиндрами, а при чередующейся обмотке — изолирующими дисками.

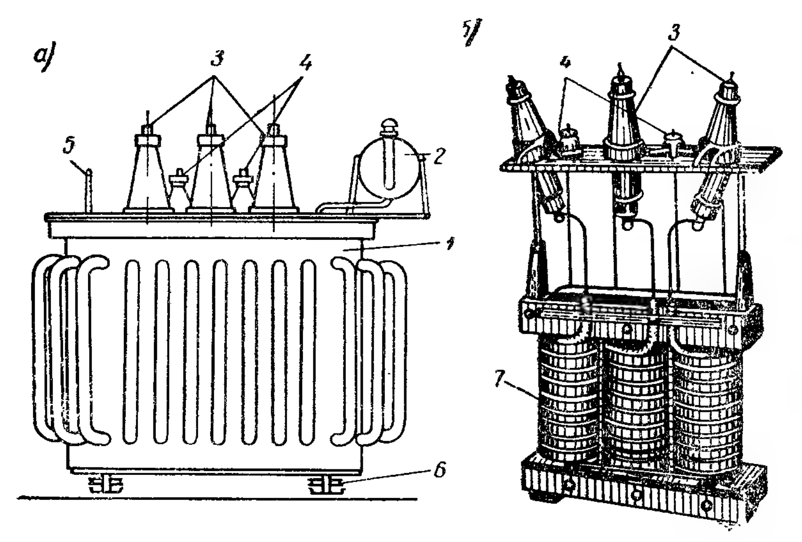



Рис. 135. Силовой трансформатор:

*а*—внешний вид, *б*—выемная часть трансформатора; *1*—бак с трубчатыми радиаторами; *2*—расширитель; *3*—ВВ выводы; *4*—НВ выводы; *5*—обмотки трансформатора; *6*—термометр; *7*—катки

Обмотки изготовляются из медного провода прямоугольного или круглого сечения, большей частью с хлопчатобумажной изоляцией, пропитанной специальными пропиточными лаками.

Выводное устройство предназначается для присоединения обмоток трансформатора к внешним (первичной и вторичной) цепям. Для этого на крышке трансформатора монтируются специальные выводы высокого и низкого напряжения, находящиеся в проходных фарфоровых изоляторах. Соединение обмоток с контактными болтами изоляторов выполняются медными изолированными проводами или шинами соответствующего сечения.

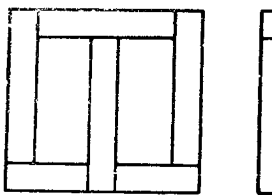
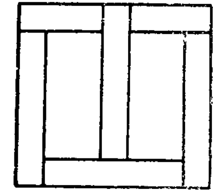



Рис. 136. Схема сборки (шихтовки) магнитопровода

Для регулировки напряжения в пределах $\pm 5\%$ от номинального на крышке трансформатора монтируются переключатели на специальных изоляторах, к которым подводятся отпайки от обмоток высшего напряжения.

Кожух трансформатора представляет собой стальной бак, в котором находится магнитопровод с обмотками. Бак

служит для защиты обмоток трансформатора от внешних воздействий. Форма и устройство кожуха зависят от системы охлаждения обмоток трансформатора. Трансформаторы с воздушным охлаждением обмоток строятся в СССР на мощность до 750 *ква*.

Обычно для охлаждения трансформаторов и повышения электрической прочности обмоток применяется специальное трансформаторное масло. Для увеличения поверхности охлаждения баки масляных трансформаторов делаются ребристыми или снабжаются трубчатыми радиаторами.

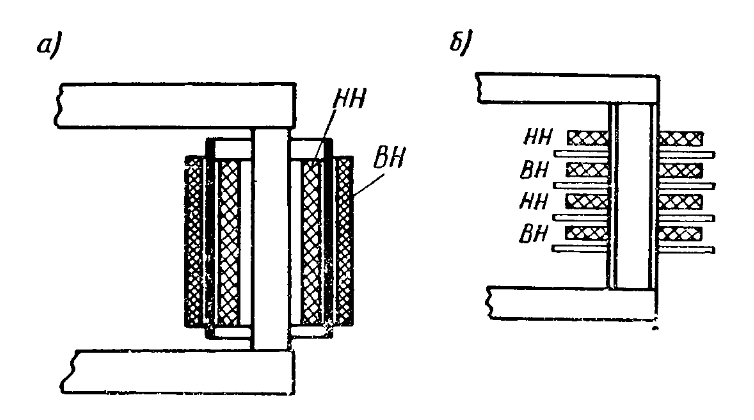



Рис. 137. Обмотки трансформатора:
*а*—концентрическая; *б*—чередующаяся

При работе трансформатора масло циркулирует от нагретых частей обмоток к радиаторам и стенкам бака и, соприкасаясь с ними, охлаждается. В нижней части бака имеется кран для выпуска масла. В крышке трансформатора есть отверстие для заливки трансформаторного масла.

На крышке трансформатора устанавливается специальный бачок — расширитель или консерватор, соединенный с баком трубкой. Расширитель значительно уменьшает поверхность соприкосновения масла с воздухом, вследствие чего уменьшается и количество влаги, попадающей в масло из воздуха.

При изменении температуры масло в баке расширяется и переходит по соединительной трубке в расширитель, в результате чего давление масла в баке не повышается.

Расширитель имеет масломерное стекло для наблюдения за уровнем масла. В нижней части расширителя находится пробка, через которую периодически выпускается влага, попадающая из воздуха в масло и ухудшающая его качество.

Температура масла контролируется с помощью термометра, установленного на крышке трансформатора.

Трансформаторное масло представляет собой минеральное масло, добываемое из нефти. Масло должно обладать высокими

физико-химическими качествами. Оно не должно замерзать при низких температурах, так как наиболее распространенные силовые масляные трансформаторы работают при температурах, ±35° С. Очень важным физическим свойством является высокая электрическая прочность. В масле не должна содержаться влага и взвешенные частицы, что снижает электрическую прочность. Масло должно противостоять окислению под действием температуры при соприкосновении с воздухом и под влиянием каталитического действия меди выводов. Окисление снижает электрическую прочность масла и приводит к образованию смолистых осадков.

Трансформаторное масло обладает способностью поглощать влагу из воздуха, поэтому в процессе эксплуатации оно периодически проверяется на электрическую прочность и, в случае необходимости, подвергается сушке.

Приведем некоторые свойства трансформаторного масла (по ГОСТ 982—56) и Правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей, 1953 г. (ПТЭ).

Вязкость при 20° С — не более 30; температура застывания — не выше —45° С; температура вспышки—не ниже 135° С; механические примеси — отсутствие; электрическая прочность для трансформаторов на напряжение ниже 6 *кв* (эксплуатационное масло) — 20 *кв*, от 6—20 *кв*—25 *кв*, от 35 *кв* и выше — 35 *кв*.

Указанные напряжения получаются при испытании масла при помощи стандартного маслопробойника, в котором расстояние между электродами равно 2,5 *мм* (ГОСТ 6581—53). Удельный вес масла при нормальной температуре находится в пределах 0,85--0,9.

## § 59. ТИПЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Различают трансформаторы:

по числу фаз сети переменного тока — однофазные, трехфазные и многофазные;

по числу обмоток — двухобмоточные, трехобмоточные и многообмоточные;

по действию — повышающие и понижающие;

по назначению — силовые, измерительные и специального назначения;

по месту установки — для внутренней и для наружной установки;

по способу охлаждения — с естественным воздушным охлаждением и с масляным охлаждением. В свою очередь трансформаторы с масляным охлаждением могут быть с искусственным воздушным охлаждением и с принудительной циркуляцией масла.

Силовые трансформаторы применяются для преобразования напряжения в силовых и осветительных сетях. Они изготовляются мощностью от 5 до 60000 (и более) *ква*, на напряжение с высокой стороны 380, 500 *в* и 3; 6; 10; 35; 110 *кв* (ГОСТ 401—41). Существуют также трансформаторы для напряжений 220 и 400 *кв*.

Измерительные трансформаторы применяются в контрольно-измерительных цепях для включения в сеть измерительных приборов. Они подразделяются на трансформаторы напряжения и трансформаторы тока.

Специальные трансформаторы представляют собой обширную группу разных по назначению трансформаторов, используемых в различных целях. Сюда относятся: автотрансформаторы, сварочные трансформаторы и трансформаторы для электрических печей, трансформаторы для ртутных выпрямителей, магнитные усилители, трансформаторы для установок связи, понизительные трансформаторы, трансформаторы техники безопасности и др.

Трансформаторы, как и все электрические машины, характеризуются номинальными величинами: номинальными первичным и вторичным напряжениями (*в* или *кв*), номинальной мощностью (*ква*), номинальными токами первичной и вторичной обмоток (*а*), номинальной частотой переменного тока (*гц*) и др. (см. ГОСТ 401—41).

## § 60. РЕЖИМЫ ХОЛОСТОГО ХОДА И РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

При работе трансформатора в режиме холостого хода его вторичная обмотка разомкнута. По первичной обмотке, включенной в цепь переменного тока, протекает ток холостого хода $I_0$, равный 2—10% номинального тока.

Произведение тока на число витков первичной обмотки определяет м. д. с., которая связана с максимальным магнитным потоком отношением.

$$\Phi_м = \frac{\sqrt{2}\, I_0 w_1}{R_м} = \frac{\sqrt{2}\, F_m}{R_м}, \qquad (135)$$

где $R_м$— магнитное сопротивление в *ом.*

В то же время при постоянной частоте магнитный поток зависит только от величины э. д. с., что следует из формулы

$$E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_м,$$

откуда

$$\Phi_м = \frac{E_1}{4{,}44 f w_1}.$$

В каждой электрической цепи в любой момент времени должно быть соблюдено равновесие напряжений, приложенное напряжение должно уравновешивать э. д. с. самоиндукции, наводимую в первичной обмотке трансформатора, и потерю напряжения в обмотке.

Для первичной цепи напряжение равно:

$$\overline{U}_1 = -\overline{E}_1 + \overline{I_0 Z_1}. \qquad (136)$$

При холостом ходе падение напряжения $I_0 Z_1$ очень мало, оно не превышает 0,5% от $\overline{U}_1$ и им можно пренебречь, тогда

$$U_1 \approx -E_1, \qquad (136а)$$

т. е. подведенное к трансформатору напряжение $U_1$ уравновешивается практически только обратной э. д. с. $E_1$. Магнитный поток в этом случае равен

$$\Phi_м = \frac{U_1}{4{,}44 f w_1}.$$

При разомкнутой вторичной обмотке трансформатора э. д. с. на зажимах этой обмотки равна напряжению $E_2 = U_2$, откуда

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = k, \qquad (137)$$

где $k$ — коэффициент трансформации.

Таким образом, напряжения первичной и вторичной обмоток прямо пропорциональны числу их витков.

Режим холостого хода позволяет определить величину магнитных потерь в магнитопроводе трансформатора. Потери в трансформаторе слагаются из потерь в стали на гистерезис и вихревые токи и потерь в меди. Эти суммарные потери невелики и ими зачастую можно пренебречь. В современных трансформаторах потери в стали, в зависимости от мощности, составляют: при мощности трансформатора 5 *ква*—1,2—1,8%, при мощности 100 *ква* —0,6—0,9%, при большей мощности — 0,2—0,5% номинальной мощности.

Работа трансформатора в режиме холостого хода наглядно характеризуется векторной диаграммой (рис. 138). Вектор э.д.с. $E_1$, наведенный магнитным потоком $\Phi$, отстает от вектора магнитного потока $\Phi$ на 90° и откладывается вниз. Вслед-

Рис. 138. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

ствие явления гистерезиса и вихревых токов магнитный поток отстает на некоторый угол $\delta$ от тока холостого хода $I_0$. Угол $\delta$ называется **у г л о м  п о т е р ь** или углом магнитного запаздывания.

Напряжение $U_1$, приложенное к первичной обмотке трансформатора, состоит из напряжения $-E_1$, уравновешивающего э.д.с. самоиндукции $E_1$, активного падения напряжения в первичной обмотке $\Delta U_a = I_0 r$ и реактивного падения напряжения $\Delta U_p = I_0 x$. Последнее в трансформаторах значительно больше активного падения напряжения.

$\Delta \overline{U}_p$ уравновешивает э. д. с., наводимую потоком рассеяния. Вектор $\Delta \overline{U}_a$ совпадает по фазе с вектором тока $I_0$ и откладывается из конца вектора $-\overline{E}_1$ в том же направлении, что и вектор тока $\overline{I}_0$. Вектор $\Delta \overline{U}_p$ опережает ток $I_0$ на 90° и откладывается из конца вектора $\Delta \overline{U}_a$ перпендикулярно к вектору тока.

Угол потерь $\delta$ обычно невелик и угол сдвига фаз между током и напряжением приближается к 90°. Коэффициент мощности при холостом ходе мал и составляет $\cos\varphi = 0{,}18 \div 0{,}3$.

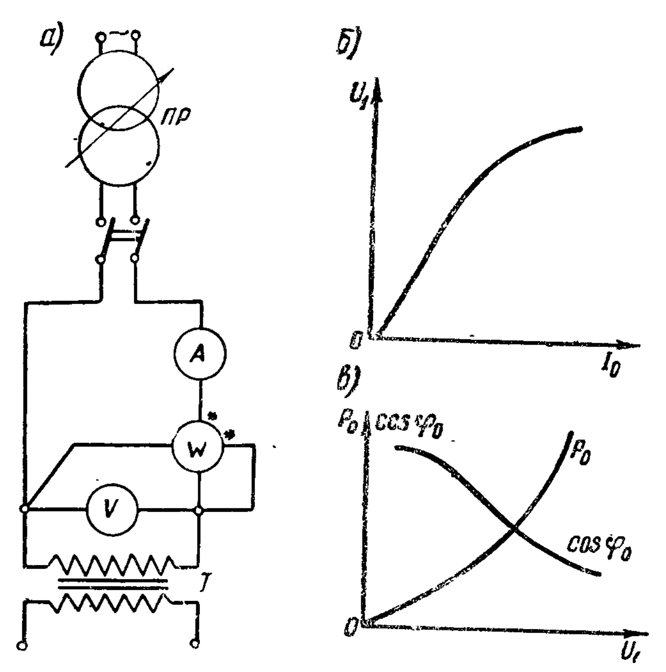



Рис. 139. Опыт холостого хода трансформатора

Величину потерь холостого хода определяют по схеме, приведенной на рис. 139, а для этого по показаниям измерительных приборов определяют: напряжение первичной цепи, ток холостого хода $I_0$ и мощность холостого хода $P_0$.

Для того, чтобы по возможности во время опыта не было высоких напряжений, опыт производят со стороны низшего напряжения трансформатора.

Порядок измерений следующий. С помощью потенциал-регулятора, постепенно повышая напряжение, подводимое к первичной обмотке трансформатора, от $U_1 = 0{,}5\ U_н$ до $U_1 = 1{,}2U_н$, делают ряд измерений величин тока, напряжения и мощности, занося их в таблицу. По данным измерений строят кривые зависимостей $U_1 = f(I_0)$ (рис. 139, *б*) и $P_0 = f(U_1)$, $\cos\varphi_0 = f(U_1)$ (рис. 139, *в*).

Значения $P_0$, $I_0$ и $\cos\varphi_0$, соответствующие номинальному напряжению, находят по построенным кривым. Ток холостого хода $I_0$ в трансформаторах большой мощности составляет 2—4% $I_н$, а в трансформаторах средней и малой мощности достигает 10% $I_н$.

При работе трансформатора под нагрузкой его вторичная обмотка замкнута на внешнее сопротивление, и по цепи проходит ток $I_2$.

Ток вторичной обмотки $I_2$ создает в ней м. д. с., которая действует в том же магнитопроводе и направлена по закону Ленца против м. д. с. первичной обмотки. Результирующий магнитный поток будет создаваться совместным действием обеих м. д. с. Первичный ток намагничивает сердечник трансформатора, вторичный его размагничивает.

Однако уменьшение общего магнитного потока вызывает уменьшение э. д. с. самоиндукции (противо-э. д. с.), наводимой в первичной обмотке. С уменьшением э. д. с. $E_1$ увеличивается ток $I_1$, который уменьшался действием $E_1$, а это вызывает увеличение намагничивающего потока $\Phi$ до его прежней величины. Таким образом намагничивающий магнитный поток при изменении нагрузки практически остается неизменным.

При работе трансформатора под нагрузкой магнитный поток $\Phi$ в сердечнике создается по закону полного тока магнитодвижущими силами обеих обмоток. Поэтому можно написать следующее равенство:

$$\bar{I}_0 w_1 = \bar{I}_1 w_1 + \bar{I}_2 w_2, \qquad (138)$$

откуда

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 + \frac{w_2}{w_1}\bar{I}_2. \qquad (138а)$$

При номинальных нагрузках ток холостого хода мал, и им можно пренебречь, считая $I_0 = 0$.

Тогда

$$I_1 + \frac{w_2}{w_1} I_2 = 0,$$

или

$$I_1 = -I_2 \frac{w_2}{w_1}. \qquad (138б)$$

Знак минус в формуле (138,б) указывает направление тока $I_2$. Из выражения (138,б) получаем, что

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}. \qquad (139)$$

Токи в первичной и вторичной обмотках обратно пропорциональны числу витков обмоток.

Векторная диаграмма трансформатора при работе его под нагрузкой дана на рис. 140.

Исходя из закона равновесия напряжений, напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора при нагрузке равно:

$$\overline{U}_1 = -\overline{E}_1 + \overline{I_1 r_1} + \overline{I_1 x_1}. \qquad (140)$$

Из этого уравнения видно, что приложенное напряжение $U_1$ преодолевает э. д. с. $E_1$ и падение напряжения на активном и реактивном сопротивлениях.

Соответственно напряжение на зажимах вторичной обмотки при нагрузке равно:

$$\overline{U}_2 = \overline{E}_2 - \overline{I_2 r_2} - \overline{I_2 x_2}. \qquad (141)$$

Для построения диаграммы вектор основного магнитного потока $\Phi$ откладывают в положительном направлении оси абсцисс. Создаваемые этим потоком первичная и вторичная э. д. с. $E_1$, $E_2$ по направлению совпадают друг с другом и отстают от магнитного потока на $90°$. Вектор тока холостого хода $\overline{I}_0$ сдвинут относительно вектора $\overline{\Phi}$ на угол потерь $\delta$.

Вектор тока $\overline{I}_2$ отстает от вектора э. д. с. $\overline{E}_2$ на угол $\psi_2$, определяемый характером активно-индуктивной нагрузки, включенной во вторичную обмотку трансформатора. Вектор тока $\overline{I}_1$ первичной обмотки определяется в результате геометрического сложения вектора токов $\overline{I}_0$ и $-\overline{I}_2\frac{w_2}{w_1}$.

При построении вектора $\overline{U}_2$ следует учитывать, что вектор активного падения напряжения $\overline{I_2 r_2}$ параллелен вектору тока $\overline{I}_2$, а вектор реактивного падения напряжения $\overline{I_2 x_2}$ перпендикулярен ему.

При построении диаграммы все данные вторичной обмотки трансформатора приводят к данным его первичной обмотки. Если этого не сделать, то при больших коэффициентах трансформации, например, $k = \frac{6000}{400} = 15$ или $k = \frac{10\,000}{400} = 25$, длины векторов э. д. с. $\overline{E}_1$ и $\overline{E}_2$ находились бы тоже в отношении $1:5$ или $1:25$. Точно так же падения напряжения, возникающие в трансформаторе, работающем под нагрузкой, нельзя суммировать между собой, так как обмотки имеют разное число витков и

разные сопротивления. Поэтому обе обмотки трансформатора приводят к одному числу витков. Для этого рассчитывают параметры вторичной обмотки, имеющей $w_2$ витков, применительно к такой

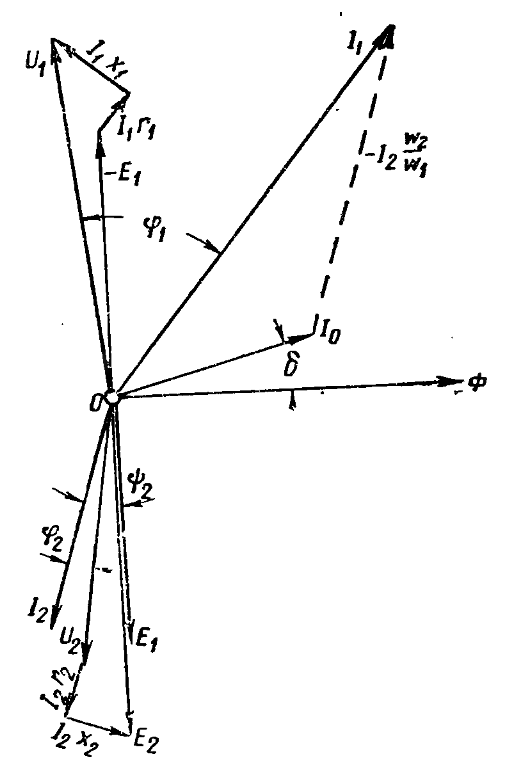



Рис. 140. Векторная диаграмма трансформатора при индуктивной нагрузке

эквивалентной ей обмотке, которая имела бы то же число витков, что и первичная обмотка.

Для получения приведенного значения вторичной э. д. с. $E_2$ надо изменить ее пропорционально коэффициенту трансформации, т. е.

$$E_2' = \frac{w_1}{w_2} E_2 = kE_2 = E_1. \qquad (142)$$

Приведенное значение вторичного тока $I'_2$ можно получить из следующих соображений. Так как мощность вторичной обмотки должна оставаться неизменной, то

$$E_2 I_2 = E_2' I_2' \qquad (143)$$

и

$$I_2' = \frac{E_2}{E_2} I_2 = \frac{1}{k} I_2. \qquad (143а)$$

Чтобы получить приведенные значения $r'_2$ и $x'_2$, надо изменить сопротивления $r_2$ и $x_2$ прямо пропорционально квадрату коэффи-

циента трансформации, что также определяется из условия сохранения мощности неизменной:

$$I_2^{2\prime} r_2' = I_2^2 r_2, \tag{144}$$

откуда

$$r_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 r_2 = k^2 r_2 \tag{144а}$$

и

$$x_2' = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 x_2 = k^2 x_2. \tag{144б}$$

На рис. 141 представлена так называемая «приведенная» диаграмма трансформатора, построенная на основе полученных приведенных значений вторичных величин. Нетрудно видеть, что на такой векторной диаграмме можно повернуть на 180° ту ее часть, которая относится ко вторичной цепи. Тогда вектор $\overline{E'_2}$ совпадет с вектором $-\overline{E_1}$, а вектор $\overline{I'_2}$ с вектором $-\overline{I'}$. При исследовании трансформатора на основании приведенной диаграммы пользуются эквивалентной электрической схемой «замещения» (рис. 142), на которой электромагнитная связь между обмотками высшего и низшего напряжения заменена электрической связью.

На этой схеме $r_1$ и $r'_2$ представляют собой активные сопротивления обмоток, а $x_1 = 2\pi f L_{S1}$ и $x_2' = 2\pi f L_{S2}$ — их реактивные сопротивления рассеяния, изображенные в виде отдельных катушек. $I_0$ — ток холостого хода, $E_1$ — э. д. с., наводимая магнитным потоком $\Phi$. Здесь реальные обмотки представлены в виде идеальных (без всякого рассеяния), объединенных в одну обмотку.

Эти две обмотки можно объединить в одну, так как потенциалы начальных и конечных точек обмоток соответственно равны друг другу $E_1 = E'_2$. Следовательно, распределение токов не изменится. Такая объединенная обмотка имеет реактивное сопротивление $x_0$ и активное $r_0$ и называется н а м а г н и ч и в а ю щ е й в е т в ь ю. Очевидно, что

$$z_0 = \frac{E_1}{I_0},$$

где $z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2}$. Величину $r_0$ находим из равенства

$$P_0 = I_0^2 r_0,$$

где $P_0$ — представляет собой мощность потерь в магнитопроводе трансформатора от гистерезиса и от вихревых токов. Отсюда

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

По первому закону Кирхгофа можно написать

$$\overline{I_1} = \overline{I_0} - \overline{I_2}',$$

откуда

$$\bar{I}_1+\bar{I}_2=\bar{I}_0.$$

В случае работы трансформатора в режиме холостого хода — $\bar{I}'_2=0$ и $\bar{I}_1=\bar{I}_0$, т. е. вторичная сторона трансформатора в создании намагничивающего тока участия не принимает.

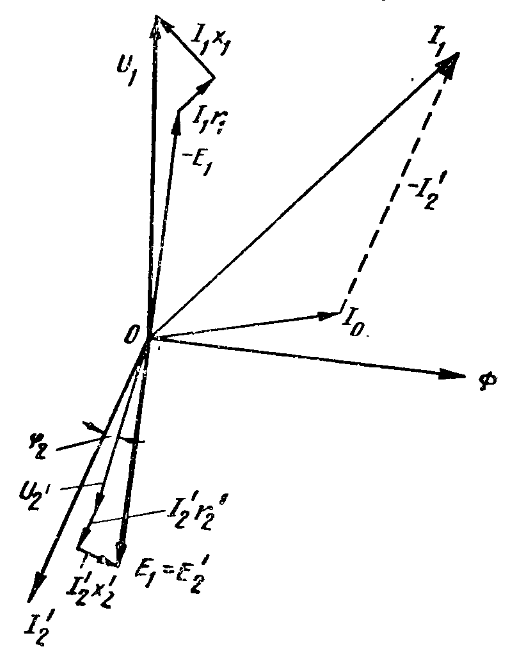



Рис. 141. Приведенная диаграмма трансформатора с индуктивной нагрузкой

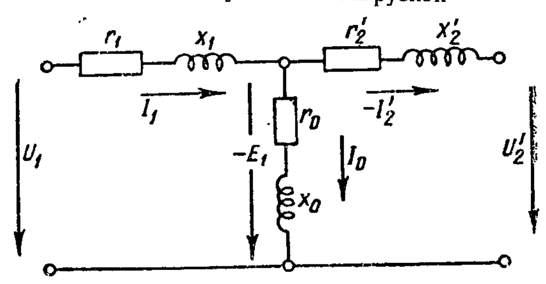



Рис. 142. Схема замещения трансформатора

## § 61. РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Режимом короткого замыкания трансформатора называется режим, при котором сопротивление внешней цепи равно нулю, т. е. когда вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко. При этом по вторичной обмотке трансформатора про-

текает ток, во много раз превышающий номинальный. Такой ток безусловно опасен для трансформатора, он допустим лишь на очень короткое время.

По ГОСТу 401—41 ток короткого замыкания, который трансформатор должен выдерживать без каких-либо повреждений, определяется как установившийся ток короткого замыкания, который не должен превышать 25-кратного значения номинального тока обмотки. Длительность протекания тока короткого замыкания в секундах не должна быть больше величины $\frac{900}{K^2}$, где $K$ — кратность установившегося тока короткого замыкания в данной обмотке.

Так как при режиме короткого замыкания имеется возможность получить ряд ценных данных для характеристики работы трансформатора, его создают искусственно.

Для этого к первичной обмотке подводят пониженное напряжение, при котором токи в обмотках имеют номинальное значение. Это пониженное напряжение называется **напряжением короткого замыкания** $U_к$. Оно обычно находится в пределах (3—15%) $U_н$.

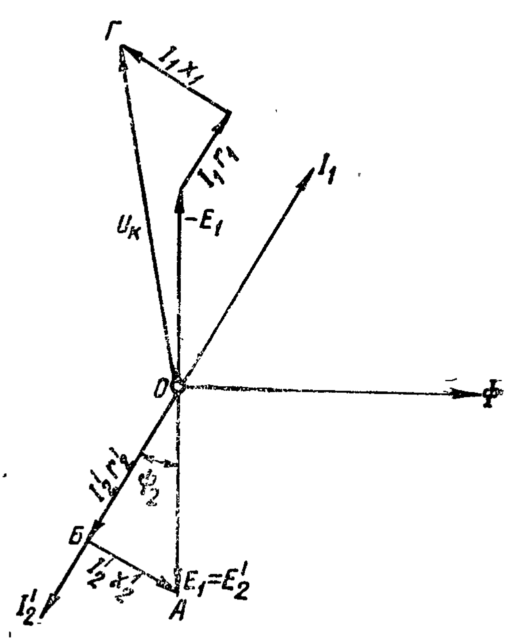



Рис. 143. Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании

Режим короткого замыкания лучше всего рассмотреть на векторной диаграмме (рис. 143). Эта диаграмма строится так же, как и общая векторная диаграмма работы трансформатора под нагрузкой. Векторы $\bar{E}_1$ и $\bar{E}_2$ отстают от вектора магнитного потока $\Phi$ на 90°. Вектор тока $\bar{I}_2$ отстает от вектора э.д.с. $\bar{E}_2$ на угол $\psi_2$. Так как напряжение $U_к$, приложенное к первичной обмотке трансформатора, невелико и ток холостого хода $\bar{I}_0$ будет мал, им можно пренебречь. Тогда вектор тока $\bar{I}_1$ будет сдвинут относительно вектора тока $\bar{I}_2$ на 180° и равен ему по величине, что видно из следующего. Если пренебречь током $\bar{I}_0$, уравнение (138) примет вид

$$\bar{I}_1 w_1 = -\bar{I}_2 w_2 = -\bar{I}_2' w_1,$$

откуда

$$\bar{I}_1 = -\bar{I}_2'.$$

Вектор падения напряжения $\bar{I}'_2\, r'_2$ на активном сопротивлении $r'_2$ параллелен вектору тока $\bar{I}'_2$. Вектор падения напряжения $\bar{I}'_2 x'_2$ на реактивном сопротивлении $x'_2$ перпендикулярен вектору тока $\bar{I}'_2$. Он откладывается от конца вектора $\bar{I}'_2\, r'_2$. Вектор напряжения короткого замыкания $\bar{U}_к$ определится в результате сложения векторов $\bar{I}_1 r_1$ и $\bar{I}_1 x_1$. Для этого отложим вверх составляющую напряжения $-\bar{E}_1$ и геометрически сложим с ней векторы $\bar{I}_1 r_1$ и $\bar{I}_1 x_1$. Этому режиму соответствует упрощенная схема замещения, приведенная на рис. 144.

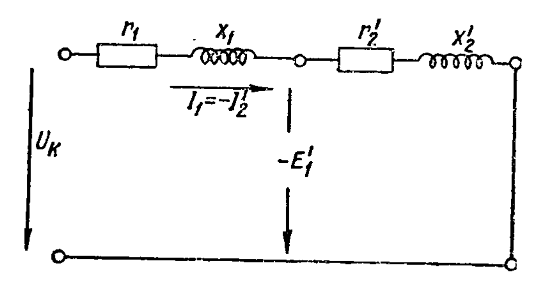



Рис. 144. Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания

Из векторной диаграммы трансформатора при коротком замыкании получают треугольник короткого замыкания (рис. 145). Для этого векторы напряжения и э. д. с. вторичной об-

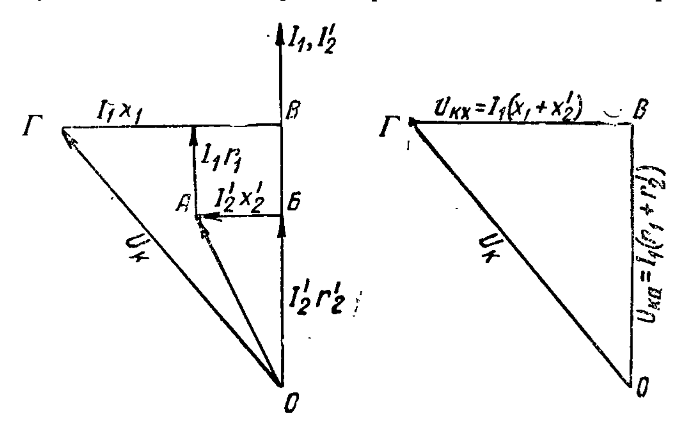



Рис. 145. Треугольник короткого замыкания

мотки (см. рис. 143) поворачивают на 180°, так чтобы вектор $\bar{E}'_2$ совпал по направлению с вектором $-\bar{E}_1$. При этом векторы токов первичной и вторичной обмоток $\bar{I}'_2$ и $\bar{I}_1$ также совпадают.

Складывая между собой векторы активного падения напряжения $\overline{I_1 r_1}$ и $\overline{I'_2 r'_2}$ и индуктивные падения напряжения $\overline{I_1 x_1}$ и $\overline{I'_2 x'_2}$, получаем треугольник короткого замыкания, в котором стороны равны

$$OB = U_a = I_1 r_1 + I_1 r_2' = I_1(r_1 + r_2') = I_1 r_к;$$

$$BГ = U_x = I_1 x_1 + I_1 x_2' = I_1(x_1 + x_2') = I_1 x_к;$$

$$OГ = U_к = I_1 z_к = I_1 \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}.$$

Сопротивления $r_к = r_1 + r_2'$ и $x_к = x_1 + x_2'$ называются **активным и индуктивным сопротивлениями короткого замыкания** или **параметрами короткого замыкания**.

Опыт короткого замыкания производят по схеме, данной на рис. 146. Чтобы иметь в цепи меньшие токи, выгоднее подводить напряжения к обмотке высшего напряжения, а обмотку низшего напряжения замыкать накоротко. Постепенно повышая напряжение, подводимое к первичной обмотке трансформатора от 3% $U_н$, доводят его до величины, при которой токи в обмотках будут равны номинальным. При этом по приборам измеряют мощность и напряжение.

Если в трехфазном трансформаторе токи и напряжения в фазах отличаются друг от друга, ток короткого замыкания определяют из отношений

$$I_к = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \; [a]; \qquad (145)$$

$$U_к = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3} \; [в]. \qquad (146)$$

Мощность короткого замыкания определяется как алгебраическая сумма показаний двух ваттметров.

$$P_к = P_{к1} + P_{к2}. \qquad (147)$$

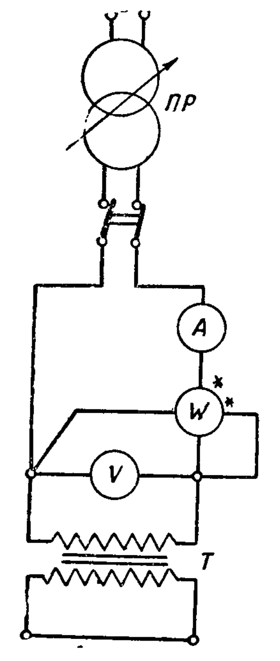


Рис. 146. Опыт короткого замыкания трансформатора

По данным опыта короткого замыкания находят полное сопротивление приведенных обмоток трансформатора по формуле

$$z_к = \frac{U_к}{\sqrt{3} I_к} \; [ом]. \qquad (148)$$

Суммы активных и реактивных сопротивлений определяются по формулам:

$$r_к=\frac{P_к}{3I_к^2}\quad [ом]; \tag{148а}$$

$$x_к=\sqrt{z_к^2-r_к^2}\ . \tag{148б}$$

Коэффициент мощности при коротком замыкании равен

$$\cos\varphi_к=\frac{P_к}{\sqrt{3}\,U_к I_к}. \tag{148в}$$

Опыт короткого замыкания позволяет определить потери в меди. Так как напряжение, приложенное к трансформатору, незначительно и магнитный поток мал, потерями в стали можно пренебречь. Тогда показания ваттметра в опыте короткого замыкания соответствуют потерям мощности в меди.

## § 62. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Изменение напряжения двухобмоточного трансформатора при номинальном режиме работы и определенном коэффициенте мощности определяется как арифметическая разность между номинальным вторичным напряжением при холостом ходе $U_{2_0}$ и напряжении $U_2$, соответствующим заданному режиму работы трансформатора, выраженная в процентах ,т. е.

$$\Delta U=\frac{U_{2_0}-U_2}{U_{2_0}}100=\frac{U'_{2_0}-U'_2}{U'_{2_0}}100=\frac{U_1-U'_2}{U_1}100\%. \tag{149}$$

Определение $\Delta U$ возможно путем построения диаграммы (рис. 147). Так как по условию трансформатор работает при номинальном режиме, то $U_1=U_н$, а $I_1=I_н$. Исходя из этого, вектор $\overline{Oa}=\frac{U}{U_н}100=100$, а вектор $\overline{Oc}=\frac{U_2'}{U_н}100$.

Построение диаграммы производится в следующем порядке. Из точки $O$ откладывается вектор тока $\overline{I_1}$ (вертикально вверх). Под углом $\varphi_2$ к вектору тока откладывается вектор $\overline{Oc}=\overline{U}'_2$. Из конца вектора $\overline{U'_2}$ проводится вектор $cb$ активного падения напряжения $\left(cv=u_{ка}=\frac{I_1 r_к}{U_н}100\right)$, совпадающий по фазе с вектором тока $I_1$, и к нему пристраивается вектор $ba$ индуктивного падения напряжения $\left(b_a=u_{кS}\frac{I_1 x_к}{U_н}100\right)$, опережающий вектор тока $\overline{I_1}$ на 90°. Замыкающийся вектор $\overline{Oa}=\overline{U}_1$. Если соединить между собой точки $a$ и $c$, то получится треугольник короткого замыкания

*abc*. Введем обозначения $cd = m_к$ и $ad = n_к$. Тогда из треугольника *abc* легко получим следующее выражение для $\Delta U$

$$\Delta U = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} 100 = \left(1 - \frac{U_2'}{U_1}\right) 100 = \left(1 - \frac{Od - cd}{U_1}\right) 100 =$$

$$= \left(1 - \frac{\sqrt{Oa^2 - d^2} - cd}{U_1}\right) 100 = \left(1 - \frac{\sqrt{U_1^2 - n_к^2} - m_к}{U_1}\right) 100 =$$

$$= \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{n_к}{100}\right)^2} + \frac{m_к}{100}\right] 100.$$

Если разложить член $\sqrt{1 - \left(\frac{n_к}{100}\right)^2}$ в биноминальный ряд, то получим

$$\sqrt{1 - \left(\frac{n_к}{100}\right)^2} = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{n_к}{100}\right)^2 - \frac{1}{8}\left(\frac{n_к}{100}\right)^4 - \ldots$$

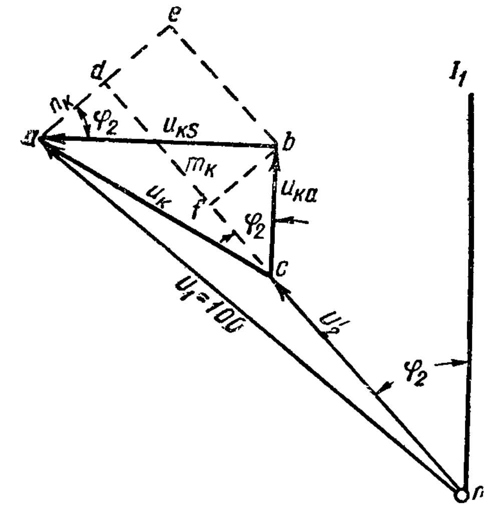



Рис. 147. Диаграмма для определения $\Delta U$

Величина $\frac{n_к}{100}$ очень мала (0,02—0,05), поэтому можно пренебречь после второго члена всеми остальными членами ряда. В этом случае

$$\Delta U = \left[1 - 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{n_к}{100}\right)^2 + \frac{m_к}{100}\right] 100 = m_к + \frac{n_к^2}{200}. \quad (150)$$

Выразим $m_к$ и $n_к$ через активное и реактивное падение напряжения в обмотках трансформатора. Из векторной диаграммы видно, что $m_к = cf + fd$, но $cf = u_{ка} \cos\varphi_2$, а $fd = ve = u_{кS} \sin\varphi_2$, тогда $m_к = u_{ка} \cos\varphi_2 + u_{кS} \sin\varphi_2$.

В то же время $n_к = ae - de$, но $ae = u_{кS} \cos\varphi_2$, а $de = fb = u_{ка} \sin\varphi_2$, тогда $n_к = u_{кS} \cos\varphi_2 - u_{ка} \sin\varphi_2$.

Подставляя эти выражения в равенство (150), получим

$$\Delta U = u_{ка} \cos\varphi_2 + u_{кS} \sin\varphi_2 + \frac{(u_{кS} \cos\varphi_2 - u_{ка} \sin\varphi_2)^2}{200}. \quad (150а)$$

Если заменить $u_{ка}$ обозначением $u_a$, а $u_{кS}$ обозначением $u_p$, то окончательно получим выражение для изменения напряжения $\Delta U$, утвержденное ГОСТ 401—41:

$$\Delta U = u_a \cos\varphi_2 + u_p \sin\varphi_2 + \frac{1}{200}(u_a \sin\varphi_2 - u_p \cos\varphi_2)^2, \quad (150б)$$

где:

$u_a$ — активная составляющая напряжения короткого замыкания в процентах;

$u_p$ — реактивная составляющая напряжения короткого замыкания в процентах;

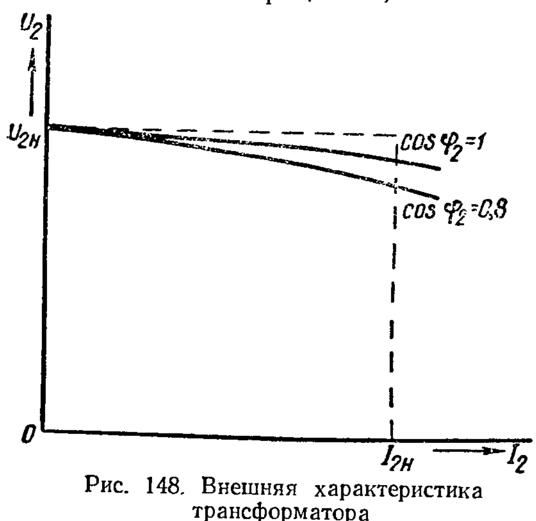



Рис. 148. Внешняя характеристика трансформатора

$\cos\varphi_2$ — коэффициент мощности вторичной цепи.

Зависимость вторичного напряжения $U_2$ от тока нагрузки $I_2$ называется **внешней характеристикой трансформатора** $U_2=f(I_2)$. Как видно из характеристики (рис. 148), с увеличением нагрузки от нуля до номинальной, напряжение на зажимах вторичной обмотки уменьшается в связи с увеличением падения напряжения в ней. Обычно внешние характеристики снимаются при $\cos\varphi_2=1$ и $\cos\varphi_2=0,8$, определяющих наиболее важные режимы работы трансформатора.

## § 63. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Мощность трансформаторов определяется его кажущейся мощностью (*ква*), равной:

$$S_{1н}=\frac{U_{1н}I_{1н}}{1000} \quad [ква]. \tag{151}$$

Активная мощность трансформатора $P_{1н} = S_{1н} \cos\varphi_1$ зависит от угла $\varphi_1$, величина которого определяется характером нагрузки трансформатора, т. е. коэффициентом мощности потребителей $\cos\varphi_2$. Поэтому активная мощность трансформатора—величина меняющаяся и не может быть принята за определяющую величину.

В трансформаторе при передаче электрической энергии из первичной цепи во вторичную возникают постоянные и переменные потери, величина которых зависит от первичной и вторичной активных мощностей. Общие потери в трансформаторе равны:

$$P=P_1-P_2=I_1U_1\cos\varphi_1-U_2I_2\cos\varphi_2. \tag{152}$$

Постоянные потери — это потери в стальном сердечнике на гистерезис и вихревые токи. Эти потери зависят только от величи-

ны магнитного потока и частоты и не зависят от нагрузки. При постоянном магнитном потоке и частоте потери в стали постоянны. Они определяются по формуле:

$$P_{ст}=P_0=p_{10.50}\left[\left(\frac{B_c}{10000}\right)^2 G_c+\left(\frac{B_я}{10000}\right)^2 G_я\right]\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}[вт], \tag{153}$$

где:

$p_{10,50}$ — потери в ваттах на 1 *кг* стали при индукции $B=10000$ *гс* и для частоты $f=50$ *гц*;

$B_c$ — индукция в сердечнике в *гс*;

$B_я$ — индукция в ярме в *гс*;

$f$ — частота в *гц*;

$G_c$ — вес сердечников в *кг*;

$G_я$ — вес ярём в *кг*.

Потери в стали могут быть определены из опыта холостого хода. Переменными потерями являются потери в меди, равные

$$P_м=P_к=I_1^2 r_1+I_2^2 r_2=I_1^2(r_1+r_2')=I_к^2 r_к, \tag{154}$$

где

$r_2'$ — приведенное значение вторичного активного сопротивления.

$r_1+r_2'=r_к$, так как при определении потерь предполагаем, что трансформатор работает в режиме короткого замыкания.

Введем коэффициент загрузки $\beta=\frac{I_1}{I_{1н}}$, равный отношению тока нагрузки к номинальному току трансформатора при одной и той же температуре. Тогда $P_{кн}=I_{1н}^2\ r_к$, а при каком-нибудь другом значении тока $I_1$ получим

$$P_к=\left(\frac{I_1}{I_{1н}}\right)^2 P_{кн}=\beta^2 P_{кн}. \tag{155}$$

Этот расчет производится для тока первичной стороны трансформатора, так как в приведенной диаграмме и схеме замещения при коротком замыкании токи первичной и вторичной цепей практически равны, т. е. $I_1 \approx I_2$. В соответствии с ГОСТом 3484—55 также следует брать значения тока той обмотки, к которой подводят напряжение, а не той, которую накоротко замыкают

По этому же ГОСТу потери, измеренные при опыте короткого замыкания, следует привести к номинальной температуре обмотки 75° С (ГОСТ 401—41). Полные потери в трансформаторе равны

$$\Sigma P=P_{ст}+P_м=P_0+P_к. \tag{156}$$

Выражения для к. п. д. можно написать в следующем виде

$$\eta=\frac{P_c}{P_1}=\frac{P_2}{P_2+P_0+\beta^2 P_{кн}}. \tag{157}$$

Наибольшее значение к. п. д. трансформатор имеет при нагрузке, при которой потери в меди становятся равными потерям в стали, т. е. когда

$$P_0 = \beta^2 P_{кн},$$

откуда

$$\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_{кн}}}. \qquad (158)$$

В современных силовых трансформаторах $\frac{P_0}{P_{кн}} \approx \left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{4}\right)$, следовательно максимальное значение к. п. д. соответствует значению $\beta \approx (0,7 \div 0,5)$.

## § 64. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформация (повышение или понижение) напряжения в трехфазных сетях может производиться либо при помощи трех однофазных трансформаторов, соединенных между собой, либо посредством одного трехфазного трансформатора, у которого три однофазных обмотки имеют общий магнитопровод.

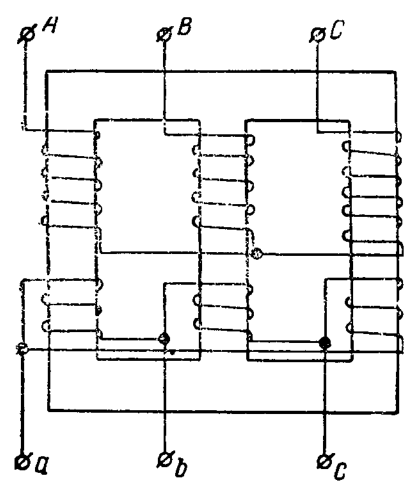



Рис. 149. Схема трехфазного трансформатора

Таким образом, трехфазный трансформатор состоит из трехстержневого сердечника и трех комплектов обмоток высшего и низшего напряжений (рис. 149).

Концы трехфазных обмоток трансформатора как первичной, так и вторичной могут быть соединены в треугольник или в звезду.

Обмотки высшего напряжения всегда выгодно соединять в звезду, так как в этом случае фазные обмотки рассчитываются на фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раза меньше линейного, что облегчает изоляцию обмоток. Наоборот, обмотки низшего напряжения выгодно соединять в треугольник, так как при этом соединении фазный ток в $\sqrt{3}$ раза меньше линейного, что при больших нагрузках весьма существенно. Наиболее распространенные способы соединения первичной и вторичной обмоток даны на рис. 150 в соответствии с ГОСТом 401—41.

Различные схемы соединения обмоток ВН и НН характеризуются смещением относительно друг друга векторов первичного и

| Схемы соединения обмоток | | Диаграммы векторов | | Условные обозначения |
|---|---|---|---|---|
| ВН | НН | ВН | НН | |
| A B C X Y Z | 0 a b c x y z | B A C | b a c | $Y/Y_0$-12 |
| A B C X Y Z | a b c x y z | B A C | b c a | $Y/\Delta$-11 |
| 0 A B C X Y Z | a b c x y z | B A C | b c a | $Y_0/\Delta$-11 |

Рис. 150. Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

вторичного линейных напряжений. Угол смещения векторов обозначается цифрой от 1 до 12, которая входит в условное обозначение группы соединений обмоток. Каждая порядковая цифра соответствует угловому смещению в 30°.

В основу цифровых обозначений углов смещения положен часовой циферблат. Вектор низшего напряжения соответствует часовой стрелке, а вектор высшего напряжения — минутной.

Если обе обмотки трансформатора (ВН и НН) при соединении в звезду имеют одинаковое направление витков, то и наводимая в них э. д. с. будет иметь одно направление. В этом случае векторы напряжений первичной и вторичной обмоток совпадут по направлению, как совпадают стрелки часов на цифре 12. Это соединение обмоток и соответствует группе 12.

Если взять соединение обмоток $Y/\triangle$, вектор низшего напряжения окажется сдвинутым относительно вектора высшего напряжения на 330° по часовой стрелке и на часовом циферблате будет указывать на цифру 11. Эта группа соединений одиннадцатая и т. д.

## § 65. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для лучшего маневрирования установленной мощностью трансформаторных подстанций и более полной загрузки трансформаторов при суточных и сезонных изменениях нагрузки трансформаторы как и генераторы могут включаться на параллельную работу. При этом первичные обмотки всех трансформаторов подключаются к первичной питающей сети, а их вторичные обмотки — к вторичной цепи, т. е. к шинам трансформаторной подстанции (рис. 151).

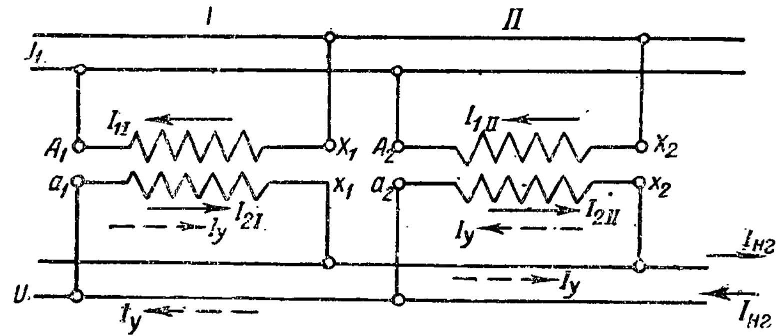



Рис. 151. Схема параллельно работающих трансформаторов

В этом случае при максимальной нагрузке (часы пик) работают все установленные трансформаторы, кроме резервных, а при уменьшении нагрузки часть трансформаторов отключается.

На электрической схеме включения трансформаторов на параллельную работу стрелками показаны направления токов в первичной и вторичной обмотках трансформаторов. Первичные и вторич-

ные э. д. с. каждого трансформатора направлены встречно по отношению друг к другу. В то же время э.д.с. во вторичных обмотках всех параллельно работающих трансформаторов по отношению к внешней цепи действуют согласно.

Для параллельной работы трансформаторов необходимо соблюдение следующих условий:

1) первичные и вторичные напряжения включаемых на параллельную работу трансформаторов должны быть соответственно равны:

$$U_{1I}=U_{1II}=U_{1III}= \dots =U_{1n}; \quad U_{2I}=U_{2II}=U_{2III}= \dots =U_{2n};$$

2) на параллельную работу должны включаться трансформаторы с одинаковыми группами соединений (если они многофазные);

3) напряжения короткого замыкания трансформаторов должны быть одинаковы:

$$U_{кI}=U_{кII}=U_{кIII}= \dots =U_{кn}.$$

Согласно ГОСТу 401—41 допускается отключение напряжений короткого замыкания трансформаторов в пределах $\pm 10\%$.

Равенство первичных и вторичных напряжений по первому условию означает, что коэффициенты трансформации трансформаторов будут равны, т. е. $k_I = k_{II} = k_{III} = \dots = k_n$.

При одинаковых коэффициентах трансформации в режиме холостого хода обеспечивается равенство вторичных э. д. с. по амплитуде, а тождественность групп соединений трансформаторов обеспечивает совпадение э. д. с. по фазе.

При этих условиях во всех замкнутых контурах, образуемых вторичными обмотками трансформаторов при параллельном их включении, сумма э. д. с. будет равна нулю и уравнительного тока не будет.

**Параллельная работа трансформаторов с разными коэффициентами трансформации.** В этом случае нарушается первое условие. Допустим, что $k_I < k_{II}$, следовательно, $E_{2I} > E_{2II}$. В контурах вторичных обмоток возникнет разностная э. д. с. $\Delta E = E_{2I} - E_{2II}$. При этом имеется в виду, что первичные обмотки трансформаторов включены на общие первичные шины и находятся под одинаковым напряжением.

Под действием разностной э. д. с. $\Delta E$ в контурах вторичных обмоток возникнет уравнительный ток $I_у$, показанный на рис. 151 пунктирными стрелками.

Первичные и вторичные обмотки трансформатора связаны между собой общим магнитным полем, и уравнительный ток во вторичных обмотках вызовет появление соответствующего уравнительного тока в контурах параллельно включенных первичных обмоток. Уравнительный ток протекает по цепи, состоящей только

из обмоток двух трансформаторов и поэтому величину уравнительного тока можно определить по формуле:

$$I_y = \frac{\Delta E}{\sqrt{(x_{кI}+x_{кII})^2+(r_{кI}+r_{кII})^2}}, \quad (159)$$

где $x_{кI}$, $r_{кI}$ и $x_{кII}$, $r_{кII}$ — индуктивные и активные сопротивления короткого замыкания.

На рис. 152, *а* рассмотрен случай, когда оба трансформатора работают в режиме холостого хода. Фазы э. д. с. вторичных об-

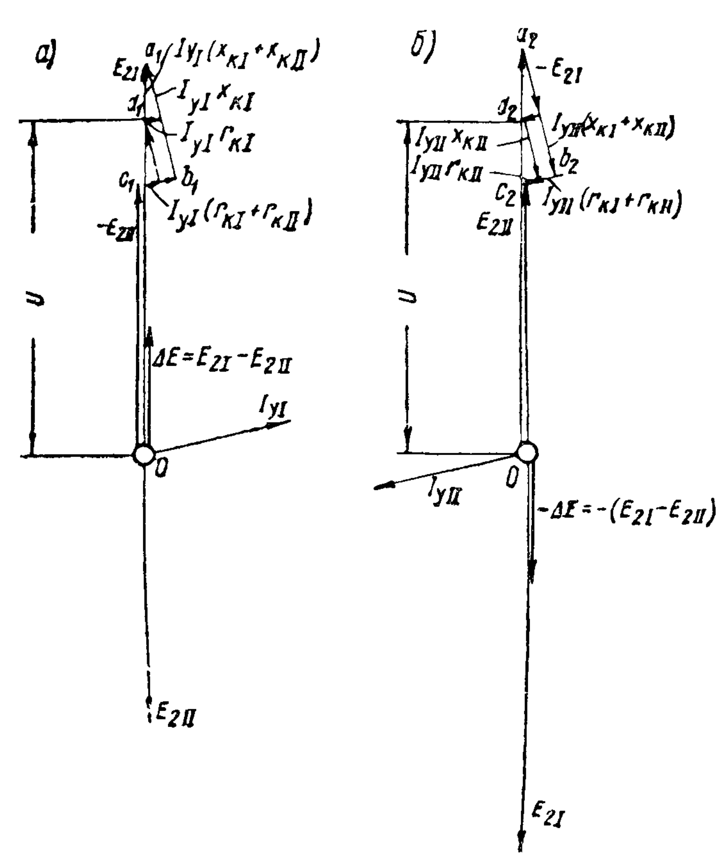



Рис. 152. Векторные диаграммы трансформаторов, параллельно работающих в режиме холостого хода ($E_{2I} > E_{2II}$)

моток трансформаторов $\bar{E}_{2I}$ и $\bar{E}_{2II}$ в любой момент времени одинаковы (т. е. в обеих обмотках имеют одинаковое направление), но по отношению друг к другу они сдвинуты по фазе на 180°. Геометрическая сумма э. д. с. $\bar{E}_{2I}+\bar{E}_{2II}$ в контуре равна их арифметической разности $E_{2I}—E_{2II}$. Можно считать, что $E_{2I}$ преодолевает

$E_{2II}$ своей составляющей — $E_{2II}$ а также, уравновешивает падение напряжения в обмотках обоих трансформаторов.

Поскольку активные сопротивления короткого замыкания очень малы по сравнению с реактивными сопротивлениями, уравнительный ток будет сдвинут относительно разностной э. д. с. $\Delta E$ на угол, близкий к 90°.

Напряжение на вторичных зажимах трансформатора *I* будет меньше $E_{2I}$ на величину падения напряжения в его обмотке. Это будет напряжение сети $U$. На рис. 152, *б* изображена векторная диаграмма второго трансформатора. Здесь, наоборот, считаем, что э. д. с. $E_{2II}$ преодолевает своей составляющей $-E_{2I}$ э. д. с. первого трансформатора, а также падения напряжения на сопротивлениях их обмоток. На схеме, приведенной на рис. 151, не трудно видеть, что если в обмотке первого трансформатора ток $I_y$ течет от начала обмотки к концу, то в обмотке второго трансформатора ток течет от конца к началу.

Следовательно, если для первого трансформатора ток $I_{yI}$ был отстающим, то для второго трансформатора фаза того же самого тока отличается на 180° и он является опережающим. Чтобы особо подчеркнуть разный характер этого тока для параллельно работающих трансформаторов, уравнительный ток во втором трансформаторе обозначен $I_{yII}$. Можно написать, что $I_{yI} = -I_{yII}$. Поскольку ток $I_{yII}$ течет навстречу э. д. с. источника $E_{2II}$, напряжение на его зажимах в данном случае будет больше э. д. с. (это известно из курса электротехники) на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки второго трансформатора. Это же видно и из векторной диаграммы. Таким образом на зажимах второго трансформатора будет то же самое напряжение $U$. Взаимодействие э. д. с. обоих трансформаторов очень сходно с взаимодействием э. д. с. двух синхронных генераторов, работающих параллельно при отсутствии нагрузки. Если мощности трансформаторов равны, а по третьему условию у них также $u_{кI} = u_{кII}$, то точка $d_1$ будет делить пополам отрезок $a_1c_1$, а точка $d_2$ будет, соответственно, находиться посередине отрезка $a_2c_2$.

Если же мощности первого и второго трансформаторов различны, то один и тот же уравнительный ток будет по-разному нагружать обмотки трансформаторов. В трансформаторе меньшей мощности электрическое сопротивление обмотки больше, чем у более мощного трансформатора, следовательно, и падение напряжения на его обмотке будет больше.

Допустим, что $P_1 < P_2$. Тогда точка $d_1$ будет перемещаться по прямой $a_1c_1$ вниз, так же как и точка $d_2$. При бесконечно большой мощности трансформатора $P_2$ сопротивление его обмотки будет равно нулю и точка $d_1$ переместится в точку $c_1$, а точка $d_2$ в точку $c_2$, т. е. напряжение на зажимах трансформаторов станет равно $U = E_{2II}$. При холостом ходе уравнительный ток приводит вторичное напряжение трансформаторов к одному общему напряжению.

Параллельная работа трансформаторов под нагрузкой характерна тем, что при $u_{кI}=u_{кII}$ нагрузочный ток распределится пропорционально их номинальным мощностям. В этом случае э. д. с. $E_{2I}$ и $E_{2II}$ во вторичных обмотках (так же, как и э. д. с. в первичных) практически изменяются одинаково. Следовательно, разностная э. д. с. $\Delta E=E_{2I}-E_{2II}$ и уравнительный ток $I_у$ остаются почти неизменными и равными их значениям при холостом ходе.

При равных мощностях токи нагрузки распределяются между трансформаторами поровну $I_{нгI}=I_{нгII}$ (рис. 153).

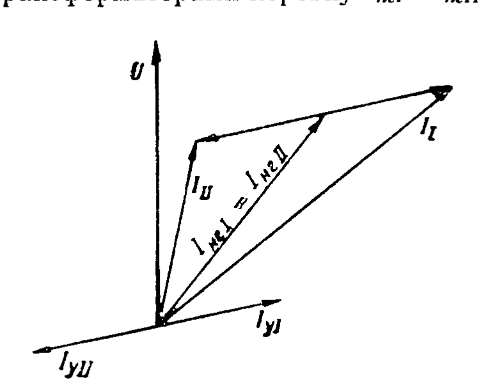


Рис. 153. Векторная диаграмма э.д.с. и токов при параллельной работе трансформаторов $P_1=P_2$

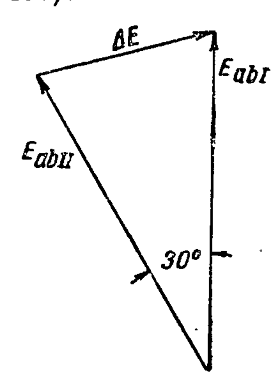


Рис. 154. Диаграмма напряжений трансформаторов, принадлежащих к разным группам

Однако в результате геометрического сложения токов нагрузки с уравнительными токами $I_{уI}$ и $I_{уII}$ результирующий ток в первом трансформаторе возрастет до величины $I_I$, а результирующий ток второго трансформатора несколько уменьшится до величины $I_{II}$. В результате первый трансформатор окажется больше нагружен, чем второй. Таким образом, при неравенстве коэффициентов трансформации двух или нескольких параллельно работающих трансформаторов трансформаторы с меньшим коэффициентом трансформации оказываются загруженными больше, чем трансформаторы с бо́льшим коэффициентом трансформации. При неравных мощностях параллельно работающих трансформаторов и неравенстве их коэффициентов трансформации следует стремиться к тому, чтобы трансформаторы меньшей мощности имели бо́льшие коэффициенты трансформации. Согласно ГОСТу 401—41 разница в коэффициентах трансформации у трансформаторов, предназначенных для параллельной работы, должна находиться в пределах $\pm 0{,}5\%$ при коэффициенте трансформации больше 3 и в пределах $\pm 1{,}0\%$ при коэффициенте трансформации меньше 3.

**Параллельная работа трансформаторов с разными группами соединений.** Если включаемые на параллельную работу трансформаторы будут принадлежать к разным группам, например, $Y/Y-12$

и $Y/\Delta-11$, вторичные э. д. с. этих трансформаторов будут сдвинуты относительно друг друга на единицу углового сдвига, т. е. на 30° (рис. 154). В результате в контуре вторичных обмоток возникнет разностная э. д. с. $\Delta E$, под действием которой в контуре будет протекать значительный уравнительный ток. Как видно из диаграммы, даже при минимальном угловом сдвиге на 30° величина разностной э. д. с. $\Delta E$ достигает следующего значения $\Delta E = AB = 2AO \sin 15° = 2AO\ 0{,}2588 = 0{,}518AO$, т. е. больше половины линейного напряжения. При бо́льших угловых сдвигах разностная э. д. с. $\Delta E$ приобретает еще бо́льшее значение. Так как сопротивления короткого замыкания $z_{кI}$ и $z_{кII}$ обмоток невелики, уравнительный ток может превышать номинальный ток в несколько раз, в связи с чем требование принадлежности трансформаторов к одинаковым группам при параллельной работе обязательно.

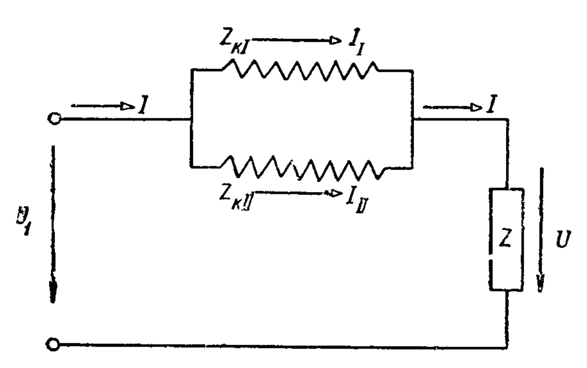



Рис. 155. Схема замещения двух параллельно работающих трансформаторов

**Параллельная работа трансформаторов с различными напряжениями короткого замыкания.** В схеме замещения (рис. 155) два параллельно работающих трансформатора могут быть изображены в виде двух сопротивлений короткого замыкания $z_{кI}$ и $z_{кII}$. Токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально их полным сопротивлениям

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{z_{кII}}{z_{кI}}. \qquad (160)$$

В то же время

$$U_к = \frac{I_н z_к}{U_1} 100,$$

откуда

$$z_к = \frac{u_к}{100} \frac{U_1}{I_н}. \qquad (161)$$

Из уравнений (160) и (161) получим

$$\frac{I_I}{I_{II}}=\frac{\frac{u_{кII}}{100}\cdot\frac{U_1}{I_{нII}}}{\frac{u_{кI}}{100}\cdot\frac{U_1}{I_{нI}}}=\frac{u_{кII}}{u_{кI}}\cdot\frac{I_{нI}}{I_{нII}}.$$

Умножив обе части этого равенства на общее для обоих трансформаторов номинальное напряжение $U_1$, получим

$$\frac{P_I}{P_{II}}=\frac{U_1 I_I}{U_1 I_{II}}=\frac{u_{кII}}{u_{кI}}\cdot\frac{P_{нI}}{P_{нII}}. \qquad (162)$$

Из этого выражения видно, что нагрузка между трансформаторами при их параллельной работе распределяется прямо пропорционально их номинальным мощностям $P_{нI}$ и $P_{нII}$, а также обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания.

## § 66. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Автотрансформаторы** имеют вместо двух раздельных обмоток высшего и низшего напряжения одну обмотку. Эта обмотка так же, как и у обычных трансформаторов, размещается на замкнутом сердечнике из листовой стали.

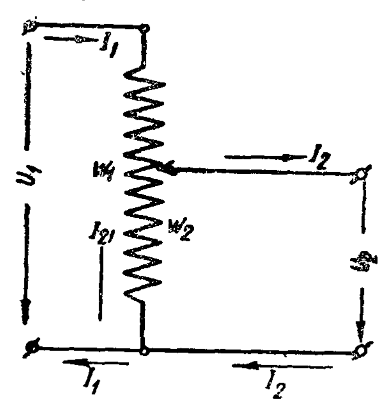


Рис. 156. Схема автотрансформатора

Вторичная обмотка у автотрансформаторов является частью первичной обмотки (рис. 156). Принцип действия автотрансформатора тот же, что и у обычного трансформатора. Между первичной и вторичной э. д. с. и числом витков обмоток действительно отношение:

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{U_1}{U_2}=\frac{w_1}{w_2}=k, \qquad (163)$$

$$U_2=\frac{U_1}{k}.$$

Токи относятся обратно пропорционально числу витков, т. е.

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{w_2}{w_1}=\frac{1}{k}, \qquad (164)$$

откуда

$$I_2=I_1 k.$$

Токи первичной и вторичной обмоток сдвинуты относительно друг друга почти на 180°. Поэтому в той части обмотки, где протекают оба тока, результирующий ток равен

$$I_{12}=I_2-I_1. \qquad (165)$$

Ток во вторичной цепи состоит из двух составляющих: разностного тока $I_{12}$ и тока $I_1$ и равен

$$I_2 = I_{12} + I_1.$$

Для определения величины передаваемой мощности в уравнении токов выразим токи $I_{12}$ и $I_1$ через ток $I_2$ и коэффициент трансформации: $I_1 = \frac{I_2}{k}$.

Но

$$I_{12} = I_2 - I_1 = I_2 - \frac{I_2}{k} = I_2\left(1 - \frac{1}{k}\right). \qquad (166)$$

Для анализа правой части уравнения напишем

$$I_2 = I_2\left(1 - \frac{1}{k}\right) + \frac{I_2}{k}.$$

Если все члены этого равенства умножить на величину вторичного напряжения $U_2$, получим уравнение мощности.

$$U_2 I_2 = \frac{U_2 I_2}{k} + U_2 I_2\left(1 - \frac{1}{k}\right), \qquad (167)$$

где:

$\frac{U_2 I_2}{k} = P_э$ — электрическая мощность в *вт;*

$U_2 I_2\left(1 - \frac{1}{k}\right) = P_{эм}$ — электромагнитная мощность.

При увеличении коэффициента трансформации $k$ электрическая мощность уменьшается, а электромагнитная растет. Поэтому автотрансформаторы обычно применяются при небольших значениях коэффициента трансформации.

Кроме того, автотрансформаторы нельзя использовать для преобразования высокого напряжения в низкое, так как при наличии электрического соединения между обмотками возможно образование высокого потенциала в сети низкого напряжения.

Автотрансформаторы применяются для регулирования напряжения при пуске синхронных и асинхронных двигателей и в ряде специальных схем, где требуется изменение напряжения в небольших пределах.

Измерительные трансформаторы применяются для расширения пределов измерения измерительных приборов, а также для обеспечения безопасности дежурного персонала, обслуживающего высоковольтные сети.

Различают измерительные трансформаторы напряжения и измерительные трансформаторы тока.

Трансформаторы напряжения позволяют расширить пределы измерения вольтметра. Первичная обмотка трансформатора включается в сеть так же, как и вольтметр, между двумя линейными или фазным и нулевым проводами сети (рис. 157,*а*). Вторичная обмотка замыкается на вольтметр.

Обмотка вольтметра имеет большое сопротивление, поэтому ток в ней мал и мощность трансформатора незначительна. Его режим работы приближается к режиму холостого хода. Это обеспечивает практически постоянное соотношение между первичным и вторичным напряжениями на зажимах трансформатора, равное его коэффициенту трансформации.

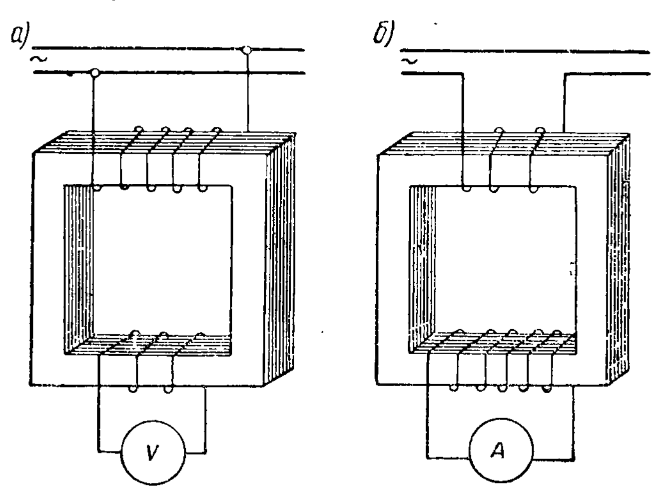



Рис. 157. Включение вольтметра и амперметра в сеть через измерительные трансформаторы

Следовательно, величина первичного напряжения определяется как произведение вторичного напряжения на коэффициент трансформации, т. е. $U_1 = U_2\, k$. Обычно шкалы вольтметров, предназначенных для включения через трансформаторы напряжения, градуируются непосредственно на напряжение первичной цепи, т. е. с учетом коэффициента трансформации.

Вторичное напряжение трансформаторов, предназначенных для измерений в высоковольтных сетях, обычно рассчитано на 100 *в*.

Для безопасности обслуживания трансформатора один конец его вторичной обмотки и кожух заземляются.

Трансформаторы тока позволяют расширить пределы измерения амперметров.

Первичная обмотка трансформатора включается последовательно в линейный провод цепи (рис. 157,*б*). Вторичная обмотка замыкается на амперметр. Так как сопротивление обмотки амперметра мало, трансформатор практически работает в режиме короткого замыкания.

По первичной обмотке трансформатора протекает весь ток нагрузки. Число витков первичной обмотки очень мало, нередко применяются одновитковые трансформаторы. Вторичная обмотка,

наоборот, имеет большое количество витков. Ток во вторичной обмотке меньше тока в первичной обмотке, так как $\frac{I_1}{I_2} \cong \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}$.

Величина искомого первичного тока равна произведению вторичного тока на коэффициент трансформации. Для обеспечения постоянства отношения токов трансформаторы должны иметь малые значения индукции, т. е. небольшое насыщение. В противном случае резко возрастет намагничивающий ток $I_0$, и отношение токов $\frac{I_1}{I_2}$ не будет удовлетворять этому равенству. При этом возрастет погрешность трансформатора.

Трансформаторы тока рассчитываются на вторичный номинальный ток, равный 5 *а*.

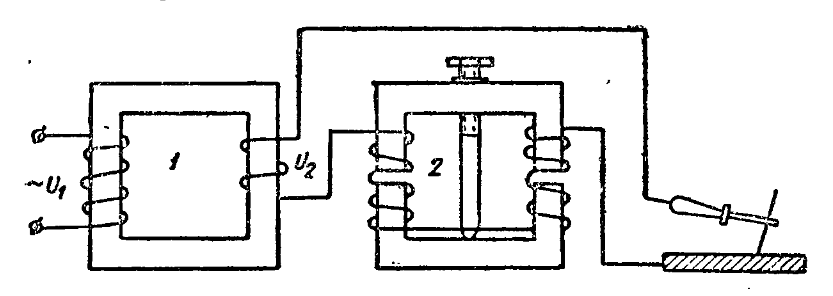



Рис. 158. Схема сварочного трансформатора СТ-2:
1—сварочный трансформатор; 2—реактор

Шкалы амперметров, включаемых в сеть через трансформаторы тока, градуируются непосредственно на ток нагрузки.

Сварочные трансформаторы подобны силовым трансформаторам. Их характерной особенностью является вторичное напряжение порядка 60—70 *в* и способность работать в режиме, близком к режиму короткого замыкания. Для регулирования величины сварочного тока в цепь сварочного трансформатора обычно включается реактор (рис. 158), представляющий собой реактивную катушку с раздвижным сердечником. Изменяя величину воздушного зазора, можно очень плавно менять величину магнитного потока, т. е. величину индуктивного сопротивления в цепи. Сварочные трансформаторы имеют крутопадающую внешнюю характеристику (рис. 159).

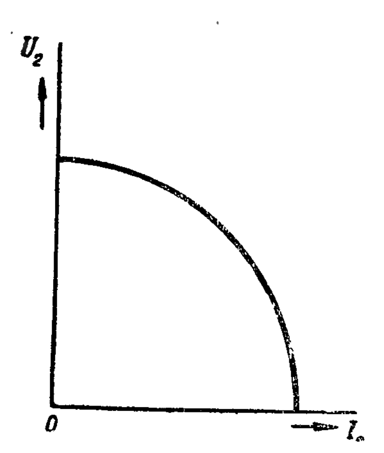



Рис. 159. Внешняя характеристика сварочного трансформатора

### *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. На каком принципе основана работа трансформаторов?
2. Каково назначение трансформаторов и какие различают типы трансформаторов?
3. Какие имеются соотношения между вторичным и первичным напряжением и числом витков обмоток трансформатора?
4. Какая пропорциональность существует между токами и числом витков обмоток трансформатора?
5. Что характеризует коэффициент трансформации?
6. Как устроен трансформатор?
7. Каково назначение расширительного бачка?
8. Каково назначение трансформаторного масла?
9. Как строится векторная диаграмма холостого хода трансформатора и каковы особенности работы трансформатора в режиме холостого хода?
10. Какой угол называется «углом потерь»?
11. Как производится опыт холостого хода трансформатора и какие выводы он позволяет сделать?
12. Чем характеризуется работа трансформатора под нагрузкой?
13. Как строится диаграмма работы трансформатора под нагрузкой? Какие выводы могут быть сделаны из этой диаграммы?
14. Какой режим называется режимом короткого замыкания трансформатора?
15. Что представляет собой треугольник короткого замыкания?
16. Как проводится опыт короткого замыкания и какие выводы могут быть из него сделаны?
17. Из чего складываются потери в трансформаторе?
18. Чему равен к.п.д. трансформатора?
19. Как устроены трехфазные трансформаторы?
20. Какие должны соблюдаться требования для параллельной работы трансформаторов?
21. Какие применяются способы соединения обмоток трансформаторов?
22. Что называется «группой соединения»?
23. На каком принципе работают и как устроены автотрансформаторы?
24. Каково назначение измерительных трансформаторов?
25. Каковы характерные особенности трансформаторов напряжения и трансформаторов тока?
26. Каково назначение реактора в схеме сварочного трансформатора?

# *Глава IX*

# АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

## § 67. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронный трехфазный двигатель был изобретен в 1889 г. М. О. Доливо-Добровольским и с тех пор получил широкое распространение. Этот двигатель вследствие простоты конструкции экономичен и надежен в работе.

Асинхронные двигатели широко применяются в системах электрических приводов различных станков в промышленности, прокатных станов в черной металлургии, в подъемно-транспортных сооружениях, угольной и нефтедобывающей промышленности (врубовые машины, горные комбайны, буровые механизмы и др.), в приводах вентиляторов, насосов, гребных винтов и т. д. Кроме

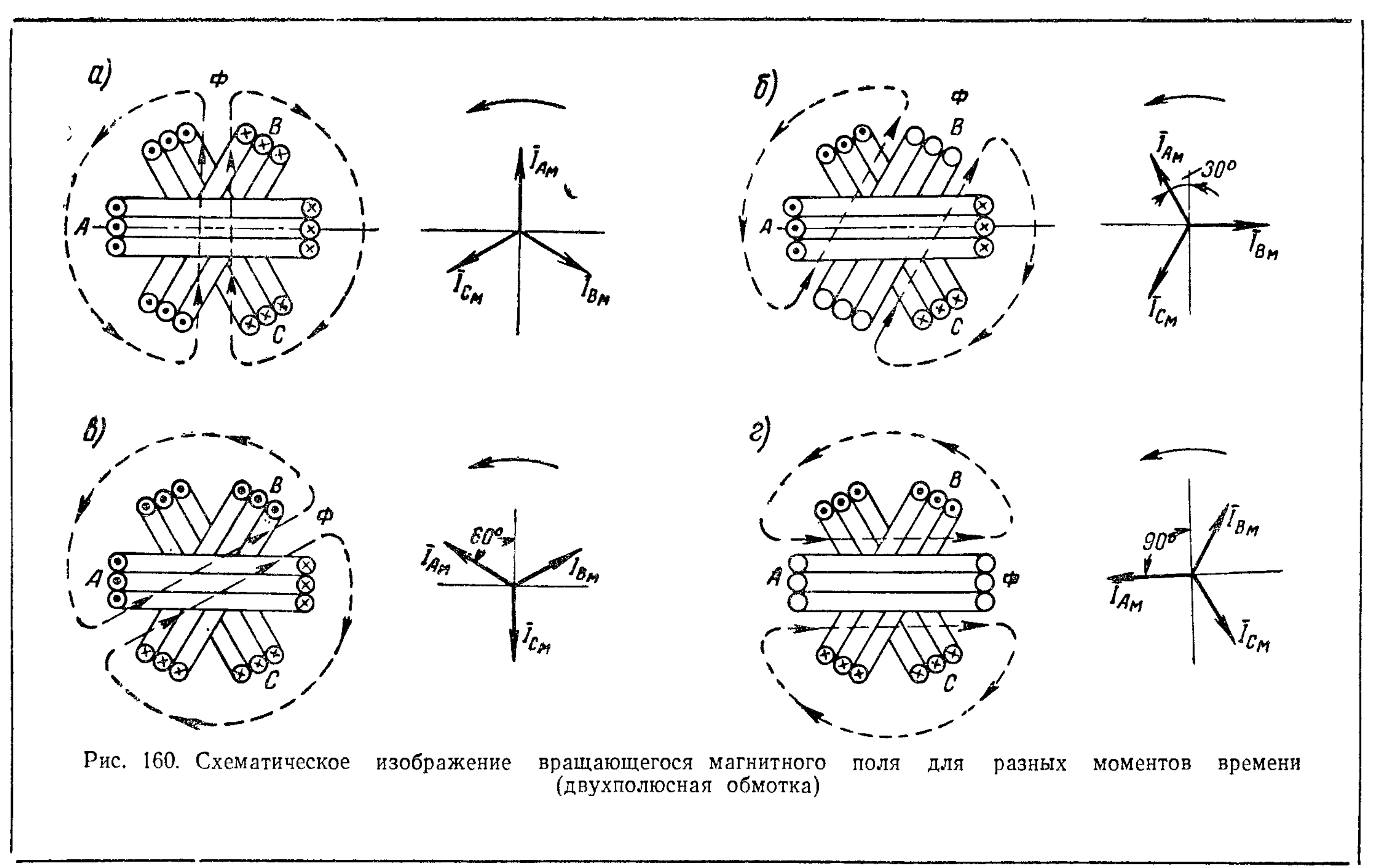



Рис. 160. Схематическое изображение вращающегося магнитного поля для разных моментов времени (двухполюсная обмотка)

того, этот электрический двигатель является основным в сельском хозяйстве.

Асинхронные двигатели строятся на мощность от десятков ватт до 30 000 *квт* и выше.

Для мелких и средних машин применяют стандартные низкие напряжения 127, 220, 380 и 500 *в*, для средних и крупных машин — высокие напряжения (3000—6000 *в*).

В основе рабочего процесса трехфазного асинхронного двигателя лежит вращающееся магнитное поле (рис. 160). На рисунке схематически показана неподвижная обмотка двухполюсной машины трехфазного тока. Обмотка состоит из трех катушек *A*, *B* и *C*, оси которых сдвинуты относительно друг друга в пространстве на 120°. В каждой из катушек протекает переменный ток одной и той же частоты, но фазы токов в соседних катушках сдвинуты на $^1/_3$ периода во времени. Мгновенные значения токов в катушках могут быть получены, если звезду векторов $\overline{I}_{A_м}$, $\overline{I}_{B_м}$ и $\overline{I}_{C_м}$ вращать с угловой скоростью $\omega = 2\pi f$. Тогда проекции этих векторов на ось ординат дадут нам мгновенные значения токов в катушках.

Допустим, что в какой-то момент времени (рис. 160,*а*) в катушке *A* течет ток, направление которого принято за положительное. Этому току соответствует вектор $\overline{I}_{A_м}$. Тогда в других катушках токи будут иметь отрицательное направление, если считать, что буквами *A*, *B*, и *C* обозначены начала соответствующих катушек.

На рис. 160,*б* звезда векторов повернулась на 30°. При этом в катушках *A* и *C* токи не успели изменить своего направления, а в катушке *B* ток оказывается равным нулю.

На рис. 160,*в* угол поворота векторов равен 60°. В катушках *A* и *C* ток все еще имеет положительное направление, в то время как в катушке *B* ток, достигнув нуля, изменил свое направление на отрицательное. На рис. 160, *г* указано направление токов для момента времени, когда ток в катушке *A* становится равным нулю, а в катушках *B* и *C* имеет отрицательное направление.

Сравнивая изображения магнитного потока для всех разобранных случаев, можно убедиться в существовании вращающегося магнитного поля. Скорость вращения поля будет равна

$$n_1 = \frac{60f}{p},$$

где:

$n_1$ — скорость вращения поля;

$f$ — частота сети;

$p$ — число пар полюсов.

В данном случае число пар полюсов $p = 1$.

В статоре машины можно расположить $p$ катушечных групп, каждая из которых содержит три катушки. При этом угол сдвига осей катушек *A*, *B*, *C* и *A′*, *B′*, *C′* (рис. 161) между собой будет

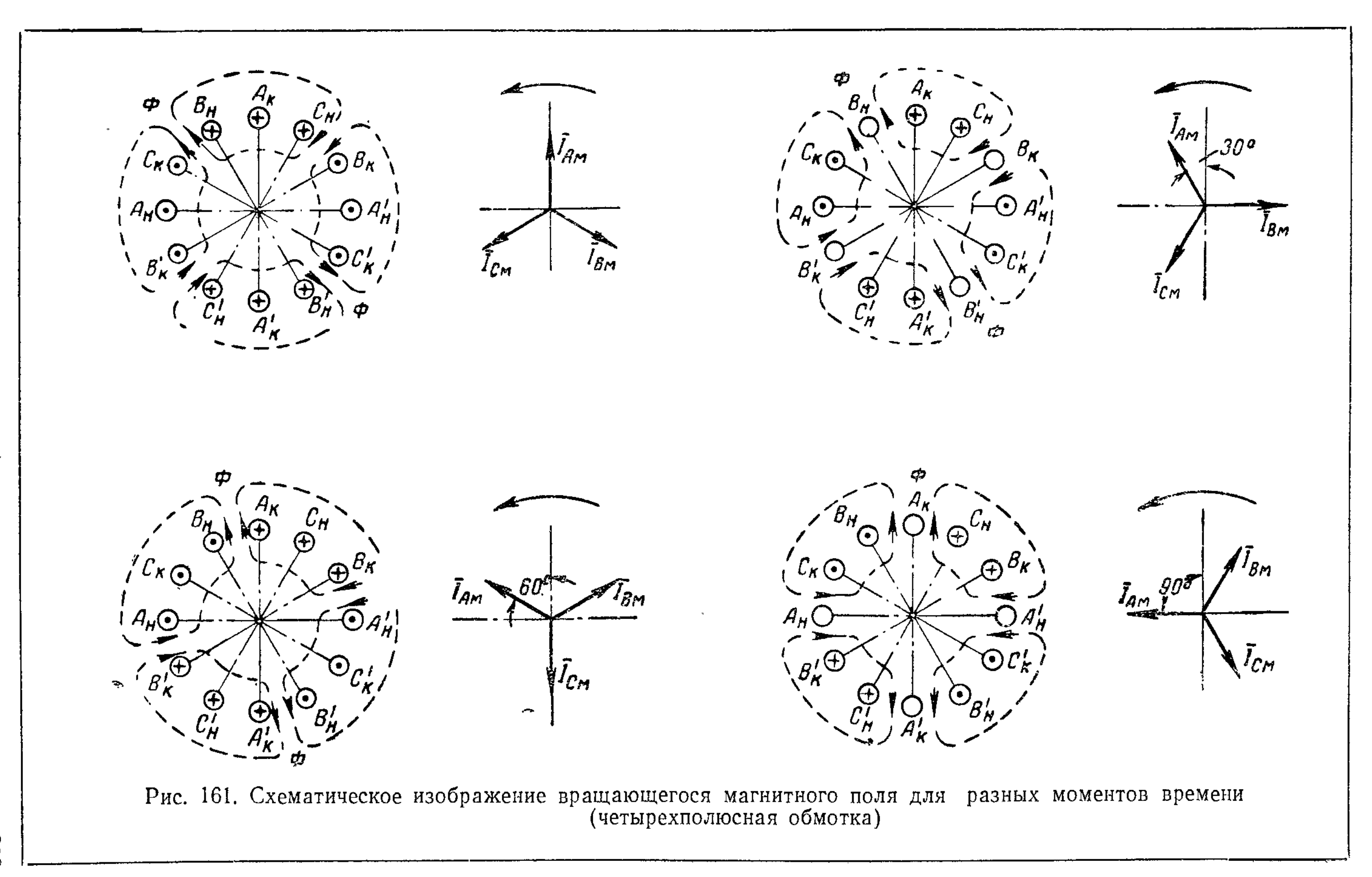



Рис. 161. Схематическое изображение вращающегося магнитного поля для разных моментов времени (четырехполюсная обмотка)

меньше 120°. Каждой катушечной группе будет соответствовать часть окружности статора, равная $\frac{360°}{p}$. Следовательно, угловой сдвиг осей катушек будет равен $\frac{360}{3p}$.

На схемах, приведенных на рис. 161, показано шесть катушек, каждая из которых имеет только один виток. Каждая сторона витка обозначена буквой с индексами, указывающими начало или конец данной катушки, а также принадлежность ее к одной из двух трехфазных катушечных групп. Выбрав в начальный момент времени за положительное направление тока направление тока в катушке $A_н - A_к$, определяем направление токов во всех остальных катушках при вращении звезды векторов. Для двух соседних катушек сдвиг между осями в пространстве будет равен $\frac{360°}{2 \cdot 3} = 60°$. За время, в течение которого звезда векторов повернулась на 90°, вращающееся магнитное поле переместилось только на 45°. В результате этого при наличии двух трехфазных катушечных групп образовалось четыре полюса вместо двух (см. рис. 160), когда было всего три катушки. Следовательно, каждой катушечной группе соответствует одна пара полюсов.

Каждой паре полюсов соответствует полюсное деление, равное 180 электрическим градусам и $\frac{180}{p}$ пространственным градусам.

Вращающаяся часть асинхронной машины имеет вторую обмотку. В зависимости от конструкции машины обмотка может быть или трехфазной, уложенной в пазы, или представлять собой ряд металлических стержней, замкнутых накоротко (так называемый короткозамкнутый ротор).

В проводниках ротора будут возникать наведенные токи, которые, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора, создадут на оси вращающий момент. Ротор будет вращаться в ту же сторону, что и вращающееся магнитное поле, так, как это возникает из общего закона Ленца; согласно этому закону токи, наводимые в проводниках при движении их в магнитном поле, имеют всегда такое направление, при котором они препятствуют движению, вызвавшему их. Ротор будет вращаться со скоростью $n_2$, несколько меньшей, чем $n_1$, поэтому такой двигатель переменного тока называется асинхронным.

В идеальном случае при полном отсутствии трения ротор стал бы вращаться синхронно с вращающимся магнитным полем, ток во вращающемся роторе стал бы равен нулю, так как проводники ротора перестали бы пересекаться вращающимся магнитным полем. Отставание ротора от вращающегося магнитного поля называется скольжением и измеряется в долях синхронной скорости:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \tag{168}$$

или

$$s=\frac{n_1-n_2}{n_1}\cdot 100\%,\qquad (168а)$$

где $s$ — скольжение.

Величина скольжения у современных двигателей составляет 2—5%.

Скорость вращения ротора можно выразить через частоту сети и скольжение, пользуясь соотношением (168)

$$n_2=n_1-n_1s=n_1(1-s)=\frac{60f_1}{p}(1-s)\quad [\text{об/мин}].\qquad (169)$$

Если ротор вращается, делая $n_2$ оборотов в минуту, при абсолютной скорости вращения магнитного поля $n_1$, скорость вращающегося магнитного поля относительно ротора равна $n_1—n_2$.

Наводимые в роторе э. д. с. и токи имеют частоту, которую называют частотой скольжения. Эта частота равна

$$f_2=p\left(\frac{n_1-n_2}{60}\right)\ [\text{пер/сек}].\qquad (170)$$

Если числитель и знаменатель правой части этого уравнения умножить на $n_1$

$$f_2=\frac{n_1-n_2}{n_1}\cdot\frac{pn_1}{60}=sf_1,\qquad (171)$$

т. е. частота тока в роторе равна произведению частоты тока в сети на величину скольжения.

## § 68. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронные двигатели переменного тока (рис. 162) состоят из двух основных частей: неподвижной — статора и подвижной — ротора.

Статор представляет собой чугунную литую станину *1*, внутри которой запрессован цилиндрический сердечник *2*, в пазах которого расположена трехфазная обмотка. С торцов статор имеет подшипниковые щиты *3*, служащие опорой для вала ротора и защищающие внутреннюю часть машины от внешних воздействий. Конструктивно статор устроен так же, как и у синхронных машин. Обмотка статора асинхронного двигателя подобна обмотке статора синхронных машин (см. § 47, рис. 107 и 108). Она может быть как однослойной, так и двухслойной. Назначение обмотки — создать м. д. с. и передать электрическую энергию ротору для преобразования ее в механическую энергию вращения.

Ротор асинхронного двигателя в зависимости от типа обмотки может быть короткозамкнутый или с контактными кольцами.

И тот и другой роторы состоят из стального сердечника, насаженного на вал и собранного из отдельных листов электротехнической стали. В пазах ротора укладывается обмотка.

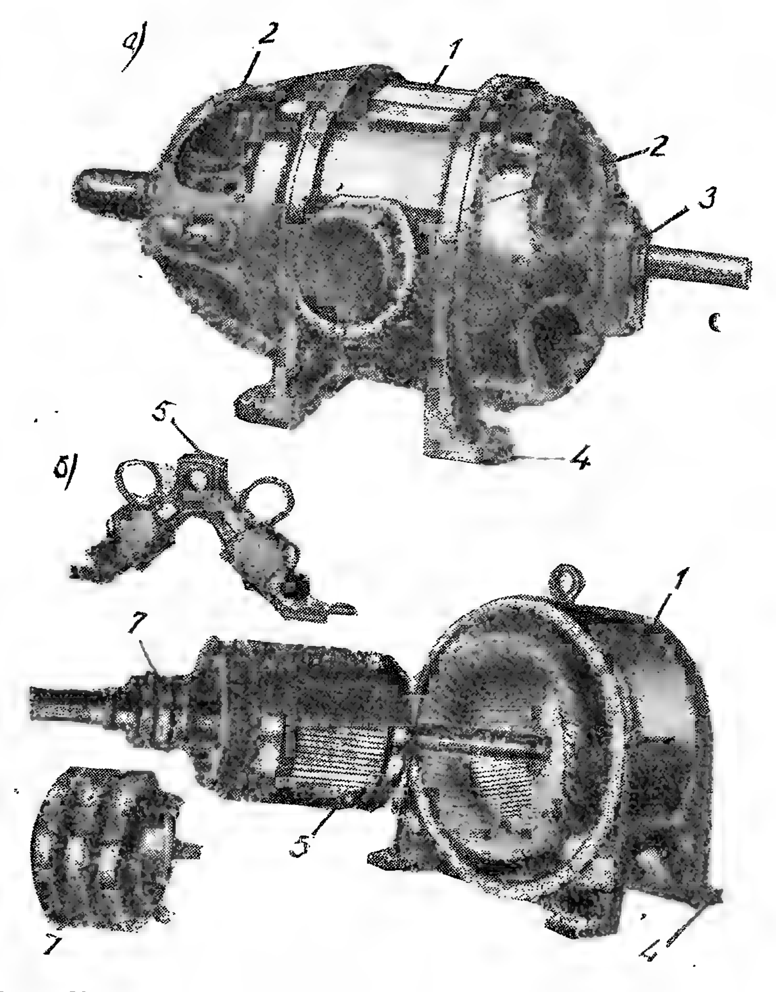



Рис. 162. Устройство асинхронного двигателя с фазным ротором:
а—общий вид; б—двигатель в разборе; 1—корпус статора; 2—подшипниковые щиты; 3—подшипник; 4—лапки; 5—ротор; 6—щеточный механизм; 7—контактные кольца

Обмотка короткозамкнутого ротора состоит из медных или алюминиевых стержней, соединенных между собой с торцов кольцами. В результате получается короткозамкнутая система. Очень часто при выполнении роторной обмотки пазы ротора в особой прессформе заливаются алюминием, причем одновременно отливаются и замыкающие кольца. Стержни с замыкающими их кольцами образуют так называемую беличью клетку (рис. 163).

Обмотка ротора с контактными кольцами выполняется, подобно обмотке статора, в виде трехфазных обмоток, соединяемых в звезду. Начала фазных обмоток выводятся к трем контактным кольцам, насаженным на вал ротора и изолированным от него. При пуске двигателя последовательно в цепь обмотки ротора через контактные кольца и щетки включается трехфазный пусковой реостат. После пуска двигателя контактные кольца при помощи специального устройства перемыкают между собой накоротко, и двигатель работает как обычный короткозамкнутый двигатель.

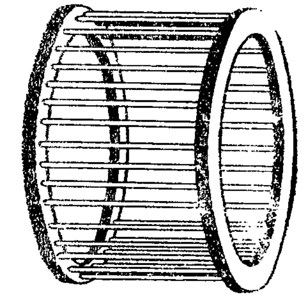


Рис. 163. Короткозамкнутый ротор — беличья клетка

Двигатели с короткозамкнутым ротором значительно проще по устройству и меньше по габаритам, поэтому они имеют наибольшее распростанение.

## § 69. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ И ТОКИ В ОБМОТКАХ СТАТОРА И РОТОРА ПРИ РАЗОМКНУТОМ РОТОРЕ

При прохождении переменного тока по трехфазной обмотке статора возникает вращающееся магнитное поле, которое наводит в обмотках статора и ротора э. д. с., действующие значения которых будут равны:

для статора

$$E_1 = 4{,}44 k_1 f_1 w_1 \Phi_м \quad [в], \tag{172}$$

для ротора

$$E_2 = 4{,}44 k_2 f_2 w_2 \Phi_м = 4{,}44 k_2 s f_1 w_2 \Phi_м \quad [в], \tag{173}$$

где:

$k_1$ и $k_2$ — обмоточные коэффициенты; для короткозамкнутой обмотки ротора $k_2$ равно единице;

$f_1$ и $f_2$ — соответствующие частоты э. д. с. статора и ротора в *гц;*

$w_1$ и $w_2$ — число последовательно соединенных витков обмотки одной фазы;

$\Phi_м$ — главный или полезный магнитный поток в *вб*.

При неподвижном роторе ($s=1$) частоты $f_1$ и $f_2$ равны между собой, т. е. $f_1=f_2$, тогда отношение между э. д. с. статора и ротора будет равно:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_1}{w_2 k_2} = k_e. \tag{174}$$

Это отношение аналогично отношению для трансформаторов. Действительно, асинхронный двигатель можно рассматривать как

трансформатор; электромагнитные процессы, происходящие в нем, подобны процессам в трансформаторе.

Если при подключении асинхронного двигателя с контактными кольцами к сети обмотка ротора разомкнута, двигатель подобен трансформатору при его работе в режиме холостого хода. Здесь первичной является обмотка статора, а вторичной — обмотка неподвижного ротора. Протекающий по трехфазной обмотке статора ток холостого хода $I_0$ создает вращающееся магнитное поле с потоком $\Phi$, называемым основным потоком. Часть основного потока $\Phi$ сцепляется с обеими обмотками и наводит в них э. д. с. $E_1$ и $E_2$. Другая часть потока $\Phi$ является потоком рассеяния $\Phi_{S1}$ ; она создает э. д. с. рассеяния $E_{S1} = -I_0 x_1$ только в обмотке статора.

При прохождении тока $I_0$ по обмотке статора с активным сопротивлением $r_1$ в ней возникает э.д.с. сопротивления $E_{a1} = -I_0 r_1$.

Между подведенным напряжением и э. д. с. $E_1$, $E_{S1}$ и $E_{a1}$ существует определенная зависимость, вытекающая из закона равновесия э. д. с., по которому подведенное напряжение $U_1$ и геометрическая сумма э. д. с. $\overline{E}_1+\overline{E}_{S1}+\overline{E}_{a1}$ в любой момент времени равны друг другу по величине, но противоположно направлены, т. е.

$$\overline{U}_1 = -(\overline{E}_1+\overline{E}_{S1}+\overline{E}_{a1})$$

или

$$\overline{U}_1 = -\overline{E}_1+\overline{I_0 r}_1+\overline{I_0 x}_1 = -\overline{E}_1+\overline{I_0 Z} \quad (175)$$

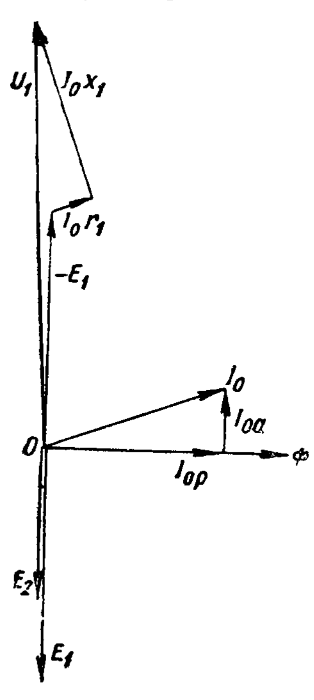



Рис. 164. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Векторная диаграмма асинхронного двигателя при разомкнутом роторе дана на рис. 164.

В асинхронном двигателе ввиду наличия между статором и ротором воздушного зазора намагничивающий ток $I_0$ больше, чем в трансформаторе, и составляет у двигателей малой мощности 35—50%, а у двигателей средней и большой мощности 20—35% номинального тока. Сопротивления $r_1$ и $x_1$ у двигателей также больше, чем у трансформаторов. Поэтому э. д. с. $E_{S1}$ и $E_{a1}$ в асинхронных двигателях составляют 2—8% от напряжения $U_1$ и совсем пренебрегать ими нельзя.

Ток $I_0$ имеет две составляющие: индуктивную (намагничивающую) $I_{0p}$, отстающую от $U_1$ на 90°, и активную $I_{0a}$, совпадающую с $U_1$ по фазе.

## § 70. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ И ТОКИ В ОБМОТКАХ СТАТОРА И РОТОРА ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ МАШИНЫ

Если ротор асинхронного двигателя заторможен и замкнут накоротко, в асинхронной машине имеют место явления, подобные явлениям режима короткого замыкания трансформатора (см. § 61). Когда обмотка ротора замкнута на сопротивление, по ней потечет ток $I_2$.

Так же, как в трансформаторе, от совместного намагничивающего действия первичной и вторичной обмоток установится такой поток $\Phi$ (общий для статорной и роторной обмоток), который наведет в обмотке статора э. д. с., соответствующую приложенному первичному напряжению.

Для этого необходимо, чтобы геометрическая сумма намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток $F_1$ и $F_2$ равнялась бы по величине и фазе м. д. с. при холостой работе

$$\overline{F}_1+\overline{F}_2=\overline{F}_0. \qquad (176)$$

При определении м. д. с. асинхронного двигателя в отличие от трансформатора надо иметь в виду, что число фаз $m_1$ в статоре и $m_2$ в роторе может быть различным; кроме того, необходимо учесть обмоточные коэффициенты $k_1$ и $k_2$. Тогда уравнение м. д. с. примет вид.

$$m_1 w_1 k_1 \overline{I}_1 + m_2 w_2 k_2 \overline{I}_2 = m_1 w_1 k_1 \overline{I}_0.$$

Если разделить обе части полученного уравнения на $m_1 w_1 k_1$, получим

$$\overline{I}_1+\frac{m_2 w_2 k_2}{m_1 w_1 k_1}\overline{I}_2=\overline{I}_0. \qquad (177)$$

При разомкнутом роторе $I_2=0$, и ток в обмотке статора является намагничивающим током, т. е. $I_1=I_0$.

При замыкании обмотки ротора накоротко, в случае заторможенного двигателя, можно подвести к первичной (статорной) обмотке пониженное напряжение, чтобы ток в статоре был равен своему номинальному значению. В этом случае ток в роторе будет близок к своему номинальному значению, а намагничивающим током $I_0$ можно будет пренебречь. Тогда из уравнения (177) получим

$$m_1 w_1 k_1 I_1 = -m_2 w_2 k_2 I_2,$$

откуда можно найти отношение токов, не обращая внимания на знак минус (см. главу VII)

$$\frac{I_2}{I_1}=\frac{m_1 w_1 k_1}{m_2 w_2 k_2}=k_i, \qquad (178)$$

где $k_i$ — коэффициент трансформации токов.

Из уравнения (178) видно, что приведенный ток

$$I_2' = \frac{m_2 w_2 k_2}{m_1 w_1 k_1} I_2. \qquad (179)$$

При приведении активного и индуктивного сопротивлений $r_2$ и $x_2$ к виду $r'_2$ и $x'_2$ исходят из того, что потери в меди приведенной и фактической обмоток ротора должны быть равны: $m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'$ а угол сдвига фаз между $E_2$ и током $I_2$ должен остаться неизменным.

Решая уравнение потерь в меди относительно $r_2'$, получаем

$$r_2' = r_2 \frac{m_2 I_2^2}{m_1 I_2'^2} = r_2 \frac{m_2}{m_1} \left( \frac{m_1 w_1 k_1}{m_2 w_2 k_2} \right)^2 = r_2 \frac{w_1 k_1}{w_2 k_2} \cdot \frac{m_1 w_1 k_1}{m_2 w_2 k_2} =$$
$$= r_2 k_e k_i = r_2 k. \qquad (180)$$

Коэффициент $k = k_e k_i$ является коэффициентом трансформации асинхронного двигателя.

Угол сдвига фаз при приведении должен оставаться неизменным, и поэтому можно написать

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{x_2'}{r_2'}, \qquad (181)$$

откуда

$$x_2' = x_2 \frac{r_2'}{r_2} = k\, x_2. \qquad (182)$$

Отсюда следует, что приведенные значения $r_2'$ и $x_2'$ прямо пропорциональны коэффициенту трансформации $k$ асинхронного двигателя.

Так же как и у трансформаторов, сопротивления $r_k = r_1 + r_2'$ и $x_k = x_1 + x_2'$ называют активным и индуктивным сопротивлениями короткого замыкания или параметрами короткого замыкания асинхронной машины.

Векторная диаграмма двигателя при коротком замыкании подобна векторной диаграмме трансформатора, приведенной на рис. 143. В опыте короткого замыкания обычно напряжение $U_k = (15 \div 25)\ \%\ U_н$.

## § 71. Э. Д. С. И ТОКИ СТАТОРА И РОТОРА ПРИ ВРАЩАЮЩЕМСЯ РОТОРЕ

При вращении ротора э. д. с. и токи в роторе будут изменяться в зависимости от величины скольжения. Э. д. с. в неподвижном роторе равна

$$E_2 = 4{,}44 k_2 f_1 w_2 \Phi_м \quad [в].$$

Во вращающемся роторе э. д. с. равна

$$E_{2s}=4{,}44k_2f_2w_2\Phi_м=4{,}44k_2sf_1w_2\Phi_м \quad [в].$$

Так как $f_2=sf_1$,

$$E_{2s}=E_2s. \tag{183}$$

Частота тока в роторе уменьшается по мере увеличения числа оборотов ротора, так как $f_2=f_1\frac{n_1-n_2}{n_1}$, и э. д. с., наводимая в обмотке ротора при холостом ходе, когда $n_2=$ макс, может быть равной всего $(0{,}03 \div 0{,}05)\ E_2$.

Ток в роторе двигателя так же, как и ток обмотки статора, создает поток рассеяния, замыкающийся вокруг витков обмотки ротора. Этот поток наводит в обмотке ротора реактивную э. д. с., равную

$$E_{L2s}=I_2x_{2s}=sE_{L2}. \tag{184}$$

Реактивное сопротивление обмотки вращающегося ротора равно

$$x_{2s}=2\pi f_2L_2=2\pi sf_1L_2=sx_2 \ [ом]. \tag{185}$$

По закону Ома ток в неподвижном роторе равен

$$I_2=\frac{E_2}{\sqrt{r_2^2+x_2^2}}=\frac{E_2}{z_2}. \tag{186}$$

Соответственно во вращающемся роторе он будет равен

$$I_2=\frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2+x_{2s}^2}}$$

или

$$I_2=\frac{E_2s}{\sqrt{r_2^2+s^2x_2^2}}=\frac{E_2}{\sqrt{\frac{r_2^2}{s^2}+x_2^2}}. \tag{187}$$

Ток обмотки ротора $I_2$ создает магнитный поток $\Phi_2$, который вращается относительно ротора со скоростью $n_2'$, равной

$$n_2'=\frac{60\,f_2}{p}. \quad \text{Так как } f_2=\frac{p\,(n_1-n_2)}{60}, \text{ то}$$

подставив это выражение в уравнение скорости $n_2'$, получаем

$$n_2'=\frac{60p(n_1-n_2)}{60p}=n_1-n_2. \tag{188}$$

Скорость вращения самого ротора равна $n_2$. Тогда скорость вращения поля ротора в пространстве, т. е. относительно неподвижного ротора, равна

$$n_{пр}=n_2'+n_2=n_1-n_2+n_2=n_1. \tag{189}$$

Таким образом, поле ротора вращается в пространстве с той же скоростью и в ту же сторону, что и поле статора, и образует с ним общее результирующее поле. Благодаря этому, независимо

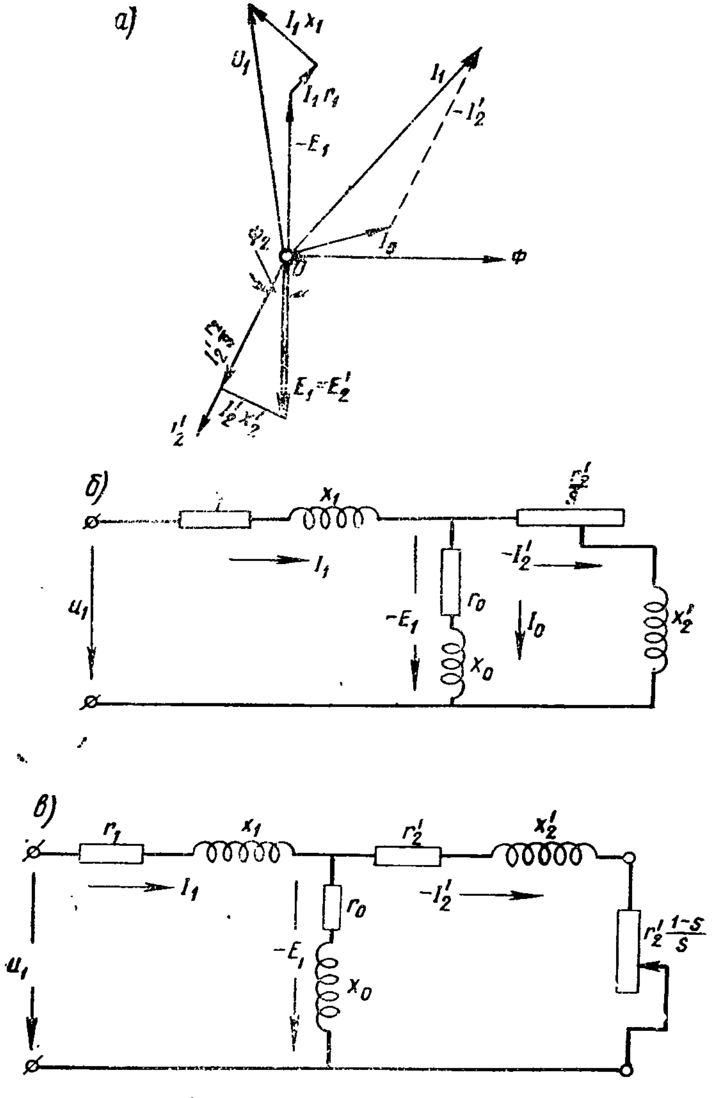



Рис. 165. Векторная диаграмма и схемы замещения асинхронного двигателя

от скорости вращения ротора, м. д. с. статора и ротора геометрически складываются, образуя полезный магнитный поток, т. е.

$$\overline{F}_1+\overline{F}_2=\overline{F}_0, \tag{190}$$

где $F_0=m_1w_1k_1I_0$ — м. д. с. статора при холостом ходе.

Аналогично трансформатору, с помощью приведенных величин $E'_2$, $I'_2$, $r'_2$ и $x'_2$ для асинхронного двигателя можно построить приведенную векторную диаграмму (рис. 165, *а*) и схему замещения (рис. 165, *б*). На схеме замещения обмотки совмещены в одну. Эта схема соответствует приведенной диаграмме асинхронного двигателя, из которой следует, что э. д. с. обеих обмоток равна $E_1=E_2'$.

Предполагаем, что обмотки статора (первичной стороны) и ротора (вторичной стороны) так же, как и в трансформаторе, не имеют рассеяния и не обладают активным сопротивлением. Активное и реактивное сопротивления рассеяния обмоток изображены в виде отдельных элементов. Ток $I_0$, протекающий по средней ветви, создает основной поток $\Phi$.

Намагничивающий ток создается совместным действием токов в статоре и роторе, т. е. $\overline{I_0}=\overline{I_1}+\overline{I_2}'$.

Таким образом, при помощи схемы замещения явления, происходящие во вращающемся асинхронном двигателе, по существу сводятся к явлениям в неподвижном трансформаторе. Однако схема замещения, приведенная на рис. 165, *б*, не вполне аналогична схеме замещения трансформатора, изображенной на рис. 141. Нетрудно видеть, что на рис. 141 $r_2'=\text{const}$, в то время, как приведенное активное сопротивление обмотки ротора $r_2'$ делится на переменную величину $s$, следовательно, и $\frac{r_2'}{s}$ будет переменной величиной. Чтобы схема замещения стала вполне аналогичной схеме замещения трансформатора, произведем несложное преобразование. Заменим величину $\frac{r_2'}{s}$ суммой двух величин

$$\frac{r_2'}{s} = r_2'+r_2'\,\frac{1-s}{s}\,.$$

Тогда схема замещения будет соответствовать схеме замещения трансформатора, вторичная обмотка которого нагружена на сопротивление $r_2'\,\frac{1-s}{s}$ (рис. 165, *в*). $r_2'$ является постоянным по величине активным сопротивлением обмотки ротора. Величина $r_2'\,\frac{1-s}{s}$ соответствует той части мощности, которая преобразуется в механическую мощность.

## § 72. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Электрическая мощность, подводимая к обмотке статора двигателя, преобразуется в механическую мощность на его валу. Электрическая мощность больше механической на величину потерь.

На рис. 166 приведена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

В асинхронных двигателях имеют место: а) потери в обмотках статора и ротора (потери в меди) $P_м$; б) потери магнитные на гистерезис и вихревые токи (потери в стали) $P_{ст}$ и в) механические потери на трение $P_{мех}$.

Величина потерь в меди равна:

для статора

$$P_{м1}=m_1 I_1^2 r_1, \tag{191}$$

для ротора

$$P_{м2}=m_2 I_2^2 r_2. \tag{192}$$

Для трехфазного двигателя с контактными кольцами число фаз $m_1=m_2=3$, для трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором $m_2=\frac{Z_2}{p}$. При расчете потерь следует иметь в виду, что активное сопротивление обмоток статора двигателей переменного тока несколько больше их омического сопротивления вследствие наличия поверхностного эффекта. Это увеличение сопротивления может быть учтено коэффициентом, равным в среднем 1,1—1,2.

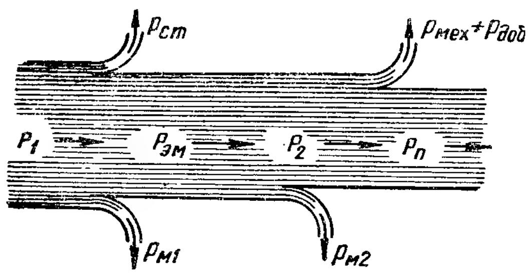



Рис. 166. Энергетическая диаграмма

Сопротивление обмотки ротора близко к его омическому сопротивлению, так как частота тока в роторе при номинальном режиме работы очень незначительна ($f_2=f_1 s$).

По этой же причине можно не учитывать и магнитные потери в стали ротора, считая, что $P_{ст}=P_{ст1}$.

Механические потери складываются из потерь на трение вращающихся частей машины о воздух, на трение в подшипниках и вентиляционных потерь. У двигателей с контактными кольцами прибавляются еще потери на трение щеток о контактные кольца.

Мощность, подводимая к двигателю, если двигатель трехфазный, определяется по формуле

$$P_1=m_1 I_1 U_1 \cos\varphi_1=3 I_1 U_1 \cos\varphi_1, \tag{193}$$

где $U_1$ и $I_1$ — фазное напряжение и ток статора.

Мощность, передаваемая ротору посредством вращающегося магнитного поля, является электромагнитной мощностью, которая равна

$$P_{эм}=P_1-(P_{м1}+P_{ст}). \tag{194}$$

Эта мощность может быть представлена как произведение

вращающего момента электромагнитных сил на угловую скорость, т. е.

$$P_{эм} = M\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} M. \qquad (195)$$

Механическая мощность на валу ротора при скорости вращения $n_2$, если пренебречь механическими потерями $P_{мех}$, которые в сравнении с другими потерями малы, равна

$$P_{полезн} = P_2 = M\frac{2\pi n_2}{60} = P_{эм}(1-s), \qquad (196)$$

так как $n_2 = n_1\ (1-s)$.

Разность между $P_2$ и $P_{эм}$ представляет собой потери в обмотке ротора (потери в меди). Эти потери равны

$$P_{м2} = P_{эм} - P_2 = P_{эм} - P_{эм}(1-s) = P_{эм}s. \qquad (197)$$

Отсюда следует, что скольжение ротора пропорционально потерям в его обмотке и является мерой этих потерь.

Потери в стали и механические потери почти не зависят от нагрузки (постоянные потери); они могут быть определены на основании опыта холостого хода.

Потери в обмотках статора и ротора зависят от нагрузки (переменные потери); они определяются на основании опыта короткого замыкания (см. § 70).

В асинхронных машинах так же, как и в других электрических машинах, имеют место добавочные потери. По ГОСТу 183—55 для этого типа машин они принимаются равными 0,5% номинальной мощности.

К. п. д. двигателя представляет собой отношение полезной мощности, развиваемой на валу, к полной мощности, т. е.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - (P_{м1} + P_{м2} + P_{ст} + P_{мех} + P_{доб})}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1}. \qquad (198)$$

В процентах к. п. д. двигателя равен

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} 100\,[\%]. \qquad (198а)$$

## § 73. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Вращающий момент асинхронного двигателя создается в результате взаимодействия тока в обмотке ротора с основным магнитным потоком машины.

Зависимость момента от мощности двигателя и его числа оборотов выражается формулой

$$M = \frac{P_2}{\omega_2} = P_2 \frac{60}{2\pi n_2} = 975\frac{P_2}{n_2} = 975\frac{I_2'^2 r_2'}{s n_1} m_1 \quad [кГм], \qquad (199)$$

где:

$\omega_2 = 2\pi \frac{n_2}{60}$ — угловая скорость ротора;

$P_2$ — мощность двигателя на валу, *квт*.

Мощность двигателя на валу $P_2$, если пренебречь механическими потерями, равна механической мощности $P_{мех}$ $(P_2 = P_{мех})$.

В то же время механическая мощность равна

$$P_{мех} = P_2 = P_{эм} - P_{м2}, \tag{200}$$

где $P_{эм}$ — электромагнитная мощность в *квт*, определяемая по формуле

$$P_{эм} = M\omega_1; \tag{200a}$$

$P_{м2}$ — мощность потерь в обмотке ротора (потери в меди). Отсюда

$$P_{м2} = M\omega_1 - M\omega_2 = M(\omega_1 - \omega_2). \tag{201}$$

Разделив и умножив правую часть уравнения на $\omega_1$, получаем

$$P_{м2} = M \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \omega_1 = Ms\omega_1, \tag{201a}$$

так как $\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = s$.

Потери в обмотке ротора $P_{м2}$, приведенные к статору, равны $P_{м2} = m_1 (I_2')^2 r_2' = Ms\,\omega_1$.

Тогда вращающий момент может быть выражен следующим уравнением

$$M = \frac{P_{м2}}{s\omega_1} = \frac{m_1(I_2')^2 r_2'}{s\omega_1} = \frac{m_1(I_2')^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1}. \tag{202}$$

Как видно, вращающий момент двигателя зависит от величины потерь мощности в роторе. Поэтому для повышения вращающего момента двигателя при пуске его последовательно с обмоткой ротора вводят добавочное активное сопротивление, увеличивая этим активные потери.

Приведенный ток в роторе $I_2'$ равен

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \tag{203}$$

Подставляя это значение тока в уравнение момента, получаем

$$M = \frac{m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{9{,}81\omega_1\left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2\right]} \quad [кГм]. \tag{204}$$

Если в уравнении вращающего момента $(x_1+x'_2)$ выразить через $x$ и умножить числитель и знаменатель на $s^2$, формула примет следующий вид

$$M=\frac{m_1U_1^2r_2's}{9{,}81\omega_1[(r_1+r_2')^2+x^2s^2]}\ [кГм]. \qquad (204а)$$

При небольших значениях скольжения, в пределах до 1,5% его номинального значения, величинами $r_1s$ и $x^2s^2$ можно пренебречь.

Тогда, полагая $\frac{m_1\,U_1^2}{9{,}81\,\omega_1r_2'}=k'$, получим

$$M=k's. \qquad (205)$$

Таким образом, в пределах до номинальной нагрузки момент двигателя прямо пропорционален скольжению. С увеличением скольжения момент растет, но лишь до определенного максимального значения $M_{макс}$, соответствующего некоторому значению $s'=0{,}12\div0{,}20$.

При дальнейшем увеличении скольжения момент будет быстро уменьшаться, так как начнет сказываться влияние произведений $r_1s$ и $xs$, которые входят в знаменатель в квадрате и которыми мы вначале пренебрегали.

Чтобы определить величину скольжения $s_{M_{макс}}$ которая соответствует максимальному моменту $M_{макс}$, следует взять первую производную от момента $M$ [см. формулу (204а)] по $s$ и приравнять ее нулю

$$\frac{dM}{ds}=\frac{9{,}81\omega_1[(r_1s+r_2')^2+x^2s^2]m_1U_1^2r_2'-m_1U_1^2r_2's9{,}81\omega_1\cdot[2(r_1s+r_2')r_1+2x^2s]}{\{9{,}81\omega_1[(r_1s+r_2')^2+x^2s^2]\}^2}=0.$$

Знаменатель этой дроби не может быть равен бесконечности, так как изменение аргумента $s$ рассматривается в пределах от 0 до 1. Следовательно, должен быть равен нулю числитель. Тогда

$$9{,}81\omega_1[(r_1s+r_2')^2+x^2s^2]m_1U_1^2r_2'-m_1U_1^2r_2's\times$$
$$\times9{,}81\omega_1[2(r_1s+r_2')r_1+2x^2s]=0;$$

$$[(r_1s+r_2')^2+x^2s^2]-2s[(r_1s+r_2')r_1+x^2s]=0;$$

$$(r_1s+r_2')^2-x^2s^2-2s(r_1s+r_2')r_1=0;$$

$$s^2(r_1^2+x^2)^2-r_2'^2=0;$$

$$s_{M_{макс}}=\frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2+x^2}}\,. \qquad (206)$$

Полученное значение $s_{M_{макс}}$ подставляем в формулу (204а).

$$M_{макс}=\frac{m_1U_1^2r_2'\frac{r_2}{\sqrt{r_1^2+x^2}}}{9,81\omega_1\left[\left(r_1\frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2+x^2}}+r_2'\right)^2+x^2\frac{r_2'^2}{r_1^2+x^2}\right]}=$$

$$=\frac{m_1U_1^2}{9,81\omega_1\left[\frac{(r_1+\sqrt{r_1^2+x^2})^2}{\sqrt{r_1^2+x^2}}+\frac{x^2}{\sqrt{r_1^2+x^2}}\right]}=$$

$$=\frac{m_1U_1^2}{9,81\omega_1\left(\frac{r_1^2+2r_1\sqrt{r_1^2+x^2}+r_1^2+x^2+x^2}{\sqrt{r_1^2+x^2}}\right)}=$$

$$=\frac{m_1U_1^2}{9,81\omega_1 2\left(\frac{r_1^2+x^2+r_1\sqrt{r_1^2+x^2}}{\sqrt{r_1^2+x^2}}\right)}=$$

$$=\frac{m_1U_1^2}{9,81\omega_1 2\ [r_1+\sqrt{r_1^2+x^2}]}. \qquad (207)$$

Ввиду того, что в формуле (206) $r_1$ весьма мало по сравнению с $x$, можно приближенно написать

$$s_{M_{макс}}=\frac{r_2'}{x}. \qquad (208)$$

Выражения (207) и (208) дают возможность сделать следующие выводы:

а) чем больше будет отношение $\frac{r_2'}{x}$, тем большее скольжение будет соответствовать максимальному моменту;

б) момент не зависит от активного сопротивления ротора $r_2'$;

в) чем больше будут значения $r_1$ и $x_1$, тем меньше момент;

г) момент пропорционален квадрату напряжения, подводимого к статору.

Ток ротора $I_2$, как известно, вследствие индуктивности обмотки ротора, отстает от э. д. с. $E_2$ на некоторый угол $\psi_2$. Из векторной диаграммы (см. рис. 165, *а*) видно, что $I_2'\frac{r_2'}{s}=E_2'\cos\psi_2$, где $\psi_2$ — угол сдвига между $E_2'$ и $I_2'$. Подставляя это значение в формулу (202), получим $M=\frac{m_1 I_2'}{\omega_1}E_2'\cos\psi_2$. Но $E_2'=E_1$. Подставив вместо $E_2'$ значение $E_1$ из формулы (172), получим, что

$$M=\frac{m_1 4,44k_1f_1w_1}{\omega_1}I_2'\cos\psi_2\Phi.$$

Дробь является постоянной величиной, и если ее обозначить через $k_м=\frac{m_1 \, 4,44 \, k_1 f_1 w_1}{\omega_1}$, тогда

$$M=k_м \Phi I_2' \cos\psi_2. \tag{209}$$

Таким образом, выражение момента асинхронного двигателя отличается от выражения момента машин постоянного тока множителем $\cos\psi_2$, так же, как и формула мощности отличается от формулы мощности машин постоянного тока тем же множителем.

Так как при работе асинхронного двигателя под нагрузкой $\cos\psi_2$ изменяется мало и близок к единице, приближенно можно написать

$$M \approx k_м I_2 \Phi. \tag{209a}$$

В начальный момент пуска асинхронного двигателя при неподвижном еще роторе относительная скорость вращающегося магнитного поля будет максимальной и индуктивное сопротивление $x$ также будет максимальным, а $\cos\psi_2$ будет минимальным. Поэтому момент асинхронного двигателя сравнительно невелик, несмотря на большой ток в роторе. Между тем, при пуске двигателя под нагрузкой часто желательно иметь наибольший момент, который может быть получен лишь при условии равенства активного сопротивления вторичной цепи $r_2'$ индуктивному сопротивлению двигателя $x$, т. е. когда $\frac{r_2'}{x}=1$ или $r_2'=x$.

Сопротивление обмотки ротора $r_2'$ меньше индуктивного сопротивления $x$. У двигателей с контактными кольцами оно может быть повышено путем введения в цепь ротора пускового реостата $r_п$. Сопротивление реостата подбирается с таким расчетом, чтобы

$$\Sigma r_2' = x = r_2' + r_п, \tag{210}$$

На рис. 167 приведены кривые зависимости момента асинхронного двигателя от величины скольжения $M=f(s)$ при разных значениях $\Sigma r_2'$. Рассмотрим подробнее одну из этих кривых, например, кривую *4*. Эта кривая может быть разделена на две области: область устойчивой работы двигателя (участок $OA$) и область неустойчивой работы (участок $AB$).

Возьмем какую-нибудь точку на участке $OA$, например, точку $a$. При установившемся режиме работы момент, развиваемый двигателем, равен моменту сопротивления

$$M=M_c. \tag{211}$$

При любом небольшом увеличении $M_c$, вызванном случайными причинами, скольжение увеличится, но при этом возрастет и вращающий момент $M$, что вызовет увеличение скорости враще-

ния двигателя. Работа двигателя будет характеризоваться точкой *a*. Если $M_c$ случайно уменьшится, то скольжение станет меньше, но при этом уменьшится и вращающий момент *M*, скорость двигателя снизится, и двигатель будет стремиться работать в режиме, определяемом точкой *a*.

Возьмем теперь какую-нибудь точку *b* в области неустойчивой работы.

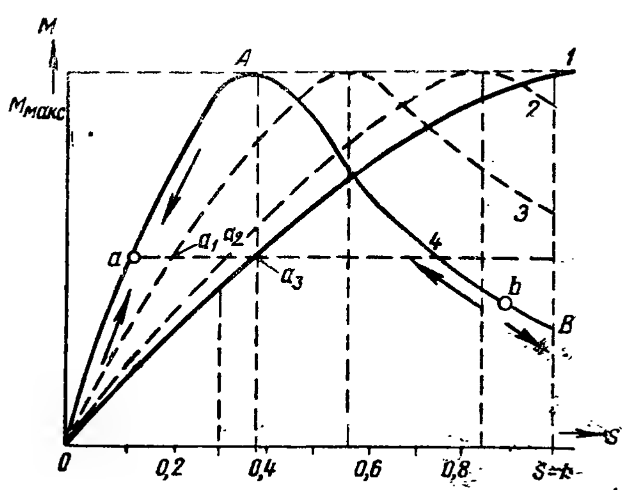



Рис. 167. Кривые зависимости $M=f(s)$ асинхронного двигателя

При любом случайном торможении при наличии избыточного момента сопротивления $\Delta M_c$ скольжение будет увеличиваться, а момент вращения *M* — уменьшаться до тех пор, пока двигатель не остановится (при $s=1$).

Если же момент сопротивления уменьшится, то уменьшится скольжение. Одновременно увеличится вращающий момент, что вызовет дальнейшее уменьшение скольжения. Момент *M* вновь увеличится, и двигатель будет развивать все большую скорость, пока не пройдет через точку *A* и окажется в области устойчивой работы.

Аналитически, если $\frac{dM}{ds} > 0$, а $\frac{dM}{dn_2} < 0$, работа двигателя будет устойчивой. Если же при $\frac{dM}{ds} > 0$ и $\frac{dM}{dn_2} > 0$, работа будет неустойчивой.

Рабочей частью кривой является участок *OA*. Если бы пуск двигателя производился без вывода реостата, изменение момента происходило бы по кривой *1*. При этом точка $a_3$ соответствовала бы номинальному моменту *M* при каком-то скольжении $s_3$.

При уменьшении сопротивления пускового реостата рабочему режиму двигателя будут соответствовать при том же номиналь-

ном моменте другие кривые, например, кривые *2*, *3* и *4* и соответственные точки $a_2$, $a_1$, $a$. При этом скольжения тоже будут другими $s_2$, $s_1$ и $s$. Следовательно, чем меньше $\Sigma r_2'$ в сравнении с постоянной величиной $x$, тем меньшую величину имеет скольжение для области устойчивой работы при номинальном моменте.

В момент пуска добавочное сопротивление реостата позволяет получить максимальный момент при $s = 1$, т. е. когда двигатель неподвижен и ему требуется сообщить максимально возможный момент. Кривые зависимости $M = f(s)$ для разных значений $\Sigma r_2'$ позволяют рассчитать процесс пуска асинхронного двигателя и секции пускового реостата.

## § 74. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рабочие характеристики показывают зависимости: скорости вращения $n_2$, тока в статоре $I_1$, момента $M$, коэффициента мощности $\cos\varphi$, к. п. д. $\eta$ и скольжения $s$ от полезной мощности двигателя $P_2$ при $U_1 = U_{1н} = \text{const}$ и $f = f_н = \text{const}$.

К рабочим характеристикам относится также механическая характеристика двигателя, показывающая зависимость скорости вращения $n$ от момента $M$, и перегрузочная способность двигателя $\frac{M_{макс}}{M_н}$.

Рабочие характеристики двигателя даны на рис. 168. Скоростная характеристика $n = f(P_2)$ представляет собой кривую, слегка наклоненную к оси абсцисс. Число оборотов двигателя определяется по формуле $n_2 = n_1 (1 - s)$. В то же время из уравнения (200а) и (208) видно, что скольжение зависит от отношения потерь в меди $P_{м2}$ к развиваемой двигателем электромагнитной мощности

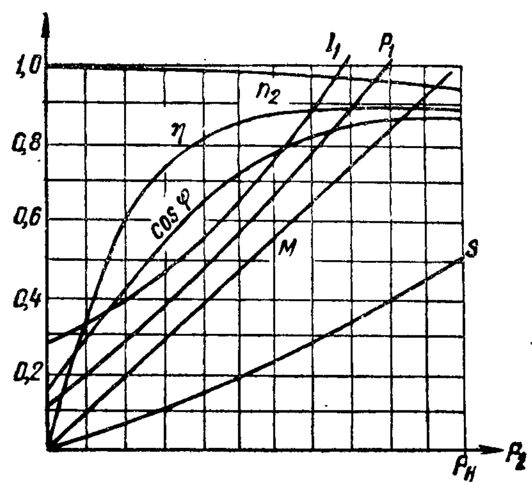



Рис. 168. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

$$s = \frac{P_{м2}}{P_{эм}}. \tag{212}$$

При холостом ходе $P_{м2} = 0$, отсюда $s = 0$ и $n_2 \approx n_1$. С увеличением нагрузки отношение $\frac{P_{м2}}{P_{эм}}$ растет, но в очень ограниченных пределах. При увеличении нагрузки от нуля до номинальной

скольжение $s$ меняется в пределах 1,5—5%, поэтому и скорость двигателя меняется незначительно. Таким образом, асинхронный двигатель обладает жесткой характеристикой скорости, т. е. его число оборотов при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной меняется незначительно, в пределах 4—8%.

Характеристика момента $M=f(P_2)$ подобна характеристике синхронного двигателя, так как скорость двигателя в пределах номинальной нагрузки остается практически постоянной.

К. п. д. двигателя, определяемый зависимостью $\eta=f(P_2)$, по мере роста нагрузки увеличивается сначала быстро, затем медленнее и имеет наибольшее значение при номинальной нагрузке $(0{,}75 \div 1{,}0)\ P_{2ном}$.

Коэффициент мощности $\cos\varphi$ при недогрузках двигателя резко падает вследствие того, что при холостом ходе и малых нагрузках двигатель потребляет реактивный намагничивающий ток, отстающий по фазе от напряжения на угол, близкий к 90°, поэтому всегда следует загружать двигатель в соответствии с его номинальной мощностью.

Коэффициент мощности асинхронного двигателя при холостом ходе не превышает 0,2 ( $\cos\varphi \leqslant 0{,}2$ ), однако с ростом нагрузки он быстро увеличивается и достигает наибольшего значения при номинальной мощности $P_2 \approx P_{2н}$. При нагрузках, превышающих номинальную мощность, увеличивается угол $\psi_2$ сдвига фаз между током $I'_2$ и э. д. с. $E'_2$, следовательно, $\cos\psi_2$ уменьшается.

Численные значения к.п.д. $\eta$ и коэффициента мощности $\cos\varphi$ при номинальных мощностях различных двигателей приведены в табл. 9.

Таблица 9

| Двигатель с короткозамкнутым ротором | | | | Двигатель с контактными кольцами | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_1$ в *в* | $P_н$ в *квт* | $\eta$ в % | $\cos\varphi$ | $U_1$ в *в* | $P_н$ в *квт* | $\eta$ в % | $\cos\varphi$ |
| 220/380 | 9,1 | 86,0 | 0,825 | 220/380 | 9,0 | 83,0 | 0,80 |
| | 15,2 | 87,0 | 0,835 | | 13,5 | 85,0 | 0,81 |
| | 32 | 89,0 | 0,855 | | 29,0 | 87,0 | 0,845 |
| | 48 | 90,3 | 0,87 | | 44,0 | 88,2 | 0,87 |
| | 72 | 90,7 | 0,88 | | 67,0 | 89,5 | 0,88 |
| | 100 | 91,5 | 0,88 | | 100,0 | 91,5 | 0,88 |

Потребляемая мощность $P_1$ и ток статора $I_1$ с увеличением полезной мощности естественно возрастают. За счет увеличения потерь (главным образом в меди), возрастание $P_1$ и $I_1$ при больших нагрузках ускоряется и кривые загибаются вверх.

Скольжение $s$ также растет с увеличением нагрузки.

Механическая характеристика $n_2=f(M)$ является обращенной кривой зависимости момента от скольжения $M=f(s)$ (рис. 169),

так как $n_2=(1-s)n_1$. Она также делится на устойчивую и неустойчивую часть. В пределах устойчивой части характеристики действует принцип саморегулирования двигателя. При увеличении момента нагрузки на валу двигателя число оборотов двигателя уменьшается, скольжение увеличивается, увеличивается и ток, а с ним и момент вращения до уравнения его с моментом сопротивления.

В неустойчивой части характеристики при увеличении момента сопротивления и уменьшении числа оборотов момент также уменьшается и двигатель остановится.

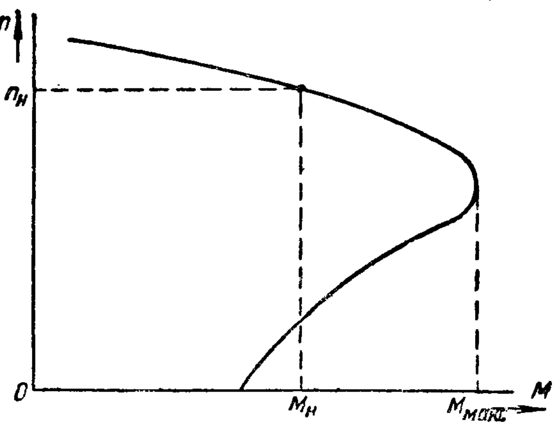



Рис. 169. Механическая характеристика $n_2=f(M)$ асинхронного двигателя

Перегрузочной способностью двигателя называется отношение максимального момента $M_{макс}$ к номинальному $M_н$

$$k_{пр}=\frac{M_{макс}}{M_н}. \quad (213)$$

Это отношение называется еще кратностью максимального вращающего момента. По ГОСТу 183—55 у современных асинхронных двигателей мощностью более 100 *квт* $к_{пр}$ должно быть не ниже 1,7. В различных машинах величина $к_{пр}$ доходит до 3.

Для характеристики двигателей учитывается также кратность начального пускового вращающего момента $\frac{M_{пуск}}{M_н}$.

По ГОСТу 183—55

$$k_{нч}=\frac{M_{пуск}}{M_н}. \quad (214)$$

Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью более 100 *квт* кратность начального пускового вращающего момента $к_{нч}$ не должна быть ниже 0,7 и достигает практически 1,5.

## § 75. ПУСК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Пусковой режим асинхронных двигателей характеризуется двумя величинами: кратностью пускового момента $\frac{M_{пуск}}{M_н}$ и кратностью пускового тока $\frac{I_{пуск}}{I_н}$. Кратность пускового момента должна быть наибольшей, кратность пускового тока — наименьшей.

У современных двигателей с короткозамкнутым ротором кратность пускового момента составляет 0,7—1,5, а кратность пускового тока 4—8.

При пуске двигатель должен развивать вращающий момент, способный преодолеть момент потерь холостого хода $M_0$, момент нагрузки на валу $M_{нагр}$ и динамический момент $M_{дин}$, т. е. он должен быть равен

$$M_{вр}=M_0+M_{нагр}+M_{дин}=M_{сопр}.$$

Если сумма моментов сопротивления не превышает значения начального вращающего момента, двигатель увеличивает скорость до наступления равновесия между моментом вращения и моментом сопротивления и переходит в рабочий режим в устойчивой части характеристики (см. рис. 167).

Большое значение для условий пуска двигателей имеет кратность пускового тока. В первый момент пуска двигателя относительная скорость магнитного потока, пересекающего обмотку неподвижного ротора, имеет наибольшую величину, так как скольжение $s=1$. Наводимая в обмотке ротора э. д. с. $E_2$ будет иметь величину, во много раз превышающую номинальное ее значение при работе двигателя ($E_{2s}=E_2s$). Соответственно и ток, создаваемый этой э. д. с. в роторе, будет превосходить в несколько раз рабочий ток ротора $I_2$. Для уравновешивания этого тока и создаваемой им м. д. с. в первичной цепи обмотки статора появится дополнительная слагающая тока. При этом пусковой ток в обмотке статора значительно превысит номинальный ток.

Так как период пуска не превышает нескольких секунд, для сохранности самого двигателя пусковые токи статора и ротора не опасны, нагрев их обмоток не успеет достичь опасных пределов. Однако большой пусковой ток в первичной цепи может вызвать резкое падение напряжения в питающей сети, особенно если она небольшой мощности.

В большинстве случаев пуск асинхронных двигателей осуществляется непосредственно включением их в сеть. Лишь в тех случаях, когда пуск двигателей сопровождается значительным падением напряжения в сети, применяют специальные способы пуска двигателей.

Для двигателей с короткозамкнутым ротором и двигателей с контактными кольцами применяют различные схемы пуска.

Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, связанный с понижением подводимого к нему напряжения, может осуществляться путем включения на период пуска последовательно с обмоткой статора двигателя пусковых сопротивлений, при помощи автотрансформатора и переключением обмотки статора со звезды на треугольник.

Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором с последовательным включением пусковых сопротивлений связан со значительными потерями мощности в сопротивлениях.

При значительных мощностях двигателей реостаты получаются громоздкими. Поэтому этот способ пуска двигателей получил ограниченное применение (лишь для пуска двигателей малой мощности).

При пуске двигателей с короткозамкнутым ротором посредством автотрансформатора (рис. 170) включается рубильник *1* при разомкнутом рубильнике *2*, и к двигателю вначале подается пониженное напряжение. По мере увеличения скорости двигателя напряжение постепенно доводят до номинальной величины, после чего замыкается рубильник *2*, и двигатель включается непосредственно в сеть, а рубильник *1* выключается.

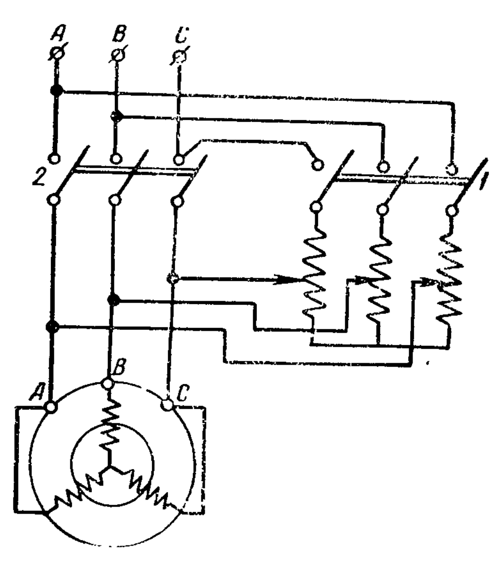



Рис. 170. Схема автотрансформаторного пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Если автотрансформатор имеет коэффициент трансформации *к*, первичные и вторичные напряжения и токи автотрансформатора будут равны

$$U_1 = kU_2; \quad I_1 = \frac{I_2}{k}.$$

В соответствии с коэффициентом трансформации *к* автотрансформатора ток $I_2'$, подводимый к двигателю, будет меньше тока при непосредственном включении двигателя в сеть в *к* раз, так как напряжение $U_2$ меньше напряжения $U_1$ в *к* раз. Отсюда можно написать, что

$$I_2' = \frac{I_1}{k} \quad \text{или} \quad I_1' = \frac{I_2'}{k} = \frac{I_1}{k^2}.$$

При пуске посредством автотрансформатора ток, подводимый к двигателю из сети, уменьшается в $к^2$ раз. Соответственно и пусковой момент двигателя уменьшается в $к^2$ раз.

Пуск двигателя переключением обмотки статора со звезды на треугольник (рис. 171) возможен лишь в том случае, если обмотка статора двигателя при работе соединена в треугольник.

Как известно, фазные и линейные напряжения и токи при соединении обмоток в звезду связаны между собой отношениями

$$U_{фY} = \frac{U_л}{\sqrt{3}}; \quad I_{фY} = \frac{U_ф}{z} = \frac{U_л}{\sqrt{3}\,z} = I_{лY},$$

а при соединении в треугольник — отношениями

$$U_{ф\triangle}=U_{л\triangle}; \quad I_{ф\triangle}=\frac{U_ф}{z}=\frac{U_л}{z}; \quad I_{л\triangle}=I_ф\sqrt{3}=\frac{U_л\sqrt{3}}{z}.$$

Из отношения токов $\frac{I_{лY}}{I_{л\triangle}}$ получаем

$$\frac{I_{лY}}{I_{л\triangle}}=\frac{\frac{U_л}{\sqrt{3}z}}{\frac{U_л\sqrt{3}}{z}}=\frac{U_л z}{\sqrt{3}z\ \sqrt{3}U_л}=\frac{1}{3}.$$

Таким образом, при соединении обмоток в звезду линейный ток в три раза меньше линейного тока при их соединении в треугольник. Точно так же и пусковой вращающий момент при соединении обмоток в звезду будет меньше пускового вращающего момента при их соединении в треугольник в три раза.

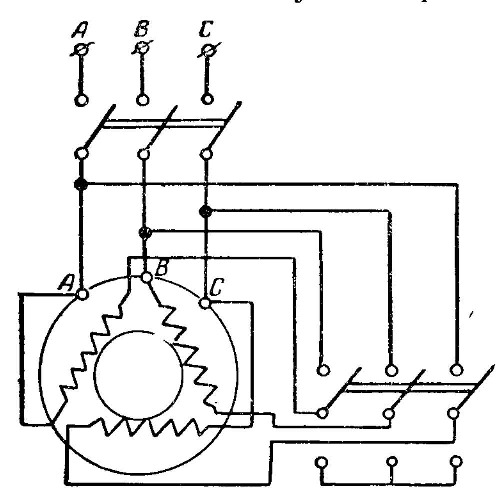


Рис. 171. Схема пуска асинхронного двигателя переключением обмотки статора со звезды на треугольник

В тех случаях, когда необходимо сохранить при пуске большой пусковой вращающий момент, а также при большой частоте пусков и остановок двигателя применяют асинхронные двигатели с контактными кольцами. Их пуск осуществляют при помощи пускового реостата, включенного последовательно с обмоткой ротора (рис. 172). Этим достигается увеличение активного сопротивления цепи ротора, что приводит, с одной стороны, к уменьшению пускового тока до 1,5÷2,5-кратной величины, а с другой стороны, — к увеличению активной составляющей тока ротора $I_2 \cos \psi_2$, а следовательно, и к увеличению вращающего момента (§ 73, рис. 167).

Чтобы величина пускового момента поддерживалась примерно одинаковой, ток в роторе должен быть по возможности постоянным.

Это условие обеспечивается путем плавного выведения из цепи статора секций сопротивлений пускового реостата. За величиной тока наблюдают по амперметру. Процесс пуска асинхронного двигателя с контактными кольцами показан на диаграмме, приведен-

ной на рис. 173. На диаграмме даны четыре кривые зависимости пускового момента от скольжения. Эти четыре кривые соответствуют четырем фиксированным положениям пускового реостата.

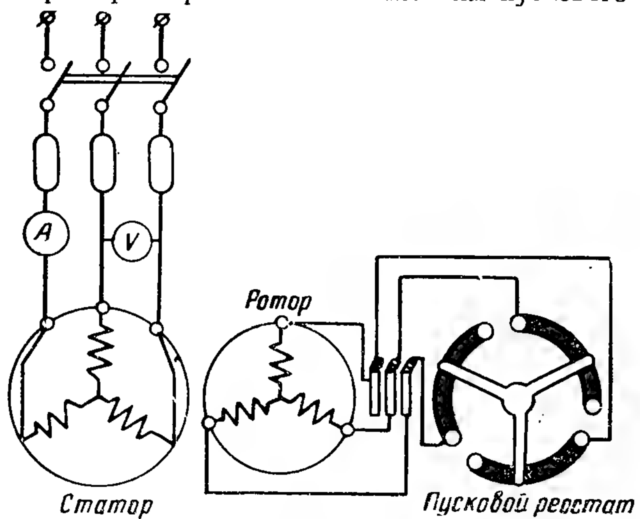



Рис. 172. Пуск в ход асинхронного двигателя с контактными кольцами

В начальный момент пуска, когда пусковой реостат введен в цепь ротора двигателя полностью, начальный пусковой момент будет равен $M_{пуск. макс}$.

По мере увеличения скорости двигателя пусковой момент будет изменяться по кривой *4* до тех пор, пока не достигнет значения $M_{пуск. мин}$. При выключении первой секции пускового реостата момент вновь возрастет до начальной величины $M_{пуск. макс}$ и по мере дальнейшего увеличения скорости вращения ротора будет изменяться уже по кривой *3*.

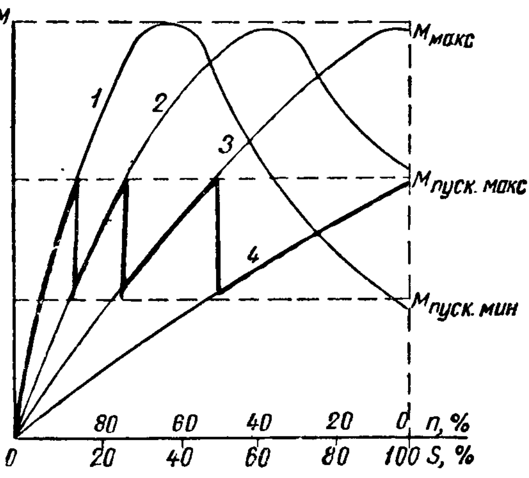



Рис. 173. Диаграмма изменения вращающего момента в период пуска асинхронного двигателя с контактными кольцами

Когда будет выключена вторая секция пускового реостата, момент опять возрастет и будет изменяться по кривой *2*. Наконец, при полном выведении реостата из цепи ротора момент после нового его увеличения до

максимальной величины, соответствующей режиму пуска, будет изменяться по кривой *1* до тех пор, пока он не уравняется с моментом нагрузки. После этого величина скольжения и число оборотов установятся постоянными.

Несмотря на лучшие пусковые свойства, асинхронные двигатели с контактными кольцами имеют сравнительно ограниченное применение, что объясняется их более сложной конструкцией, большей стоимостью и тем, что эксплуатация их ввиду наличия контактных колец и щеток сложнее.

## § 76. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧИСЛА ОБОРОТОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ

Из уравнения числа оборотов асинхронного двигателя

$$n_2=n_1(1-s)=\frac{60f}{p}(1-s)$$

следует, что изменение скорости возможно при изменении частоты $f_1$ и числа пар полюсов $p$. У асинхронных двигателей с контактными кольцами можно изменять скорость вращения реостатом в цепи ротора.

Частота промышленных сетей постоянная и равна 50 *гц*. Поэтому для изменения частоты сети необходимо ставить специальный генератор.

Таким образом, этот способ регулировки применим только в автономных установках, например, в гребных судовых установках, где генератор связан с гребным двигателем непосредственно электрическим валом. В этом случае изменение частоты синхронного генератора производится регулировкой скорости первичного двигателя. Регулировка скорости двигателя-исполнителя путем изменения частоты тока возможна только в ограниченных пределах. Надо иметь в виду, что при изменении частоты будут меняться также в общем случае напряжение на зажимах, поток, ток холостого хода, момент, мощность и т. д.

Регулировка скорости вращения реостатом в цепи ротора производится при помощи регулировочного реостата, который включается для этого в цепь ротора.

Так как в цепь ротора введено дополнительное сопротивление, то ток $I'_2$ соответственно уменьшится, что в свою очередь вызовет уменьшение вращающего момента $M$, и скорость вращения двигателя $n$ начнет падать, а скольжение — увеличиваться. При этом э. д. с. $E'_{2s}=E_2's$ возрастет и вызовет увеличение тока $I_2'$ до его прежнего значения. Момент $M$ уравняется со статическим моментом $M_{cm}$, уменьшение скорости прекратится, и двигатель будет вращаться с постоянной скоростью, несколько меньшей, чем начальная. Основным недостатком этого способа регулирования скорости вращения асинхронного двигателя является уменьшение к. п. д. двигателя пропорционально уменьшению скорости. При незначи-

тельных нагрузках, когда момент двигателя близок к моменту холостого хода, пределы регулирования скорости вращения весьма ограничены.

Этот способ также мало экономичен, так как связан с потерей мощности в реостате, который при этом должен быть рассчитан на полный рабочий ток и имеет поэтому значительные габариты и вес.

Наиболее распространен способ регулирования числа оборотов двигателя путем изменения числа пар полюсов обмотки статора.

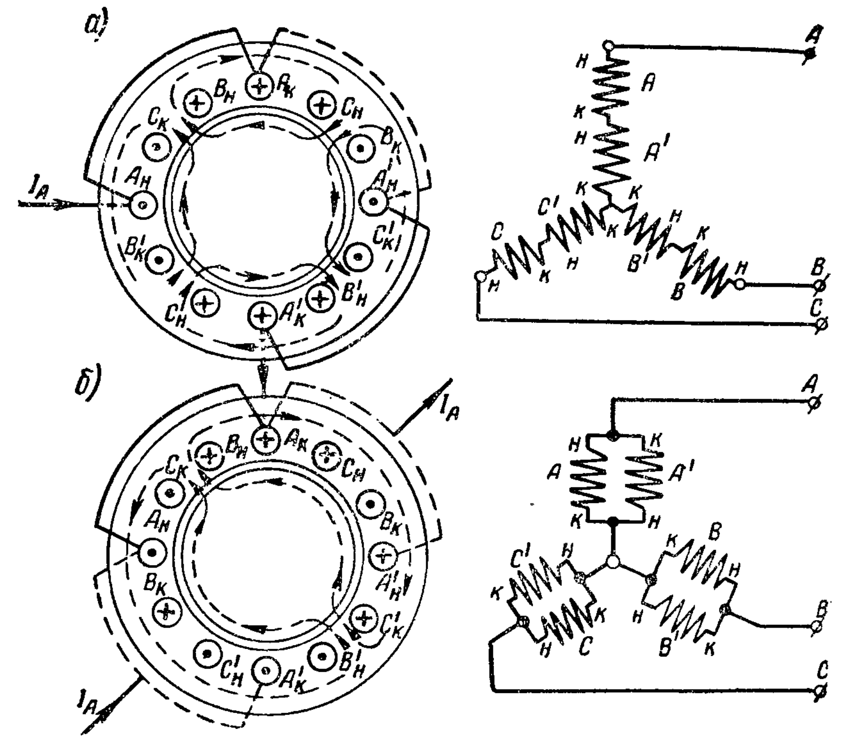


Рис. 174. Схема переключения обмотки статора на четыре и два полюса

Это достигается переключением катушечных групп фаз статора последовательно или параллельно друг другу. При последовательном соединении катушечных групп (рис. 174, *а*) статорная обмотка имеет четыре полюса, при параллельном их включении — два полюса (рис. 174, *б*). Для ясности на рисунке в разрезе показано включение катушечных групп лишь одной фазы, на принципиальной схеме — всех трех фаз.

На рис. 174,*а* катушечные группы соединены согласно, т. е. конец первой группы $A_к$ соединен с началом $A_н'$ второй группы.

При параллельном соединении катушечных групп выводы второй катушечной группы в каждой фазе переставлены так, что ко-

нец первой группы $A_к$ соединяется с началом второй группы $A'_н$, а начало первой группы $A_н$ с концом второй группы $A'_к$. Вследствие этого токи во второй группе каждой фазы изменили свое направление на обратное по сравнению с направлением токов, показанным на рис. 174, *а*.

Соединительные проводники с передней стороны машины показаны сплошными линиями, а с задней стороны — пунктирными.

Потоки в магнитной цепи также показаны пунктирными линиями. Таким образом, при последовательном включении катушек скорость вращения магнитного поля $n_1 = \frac{f\,60}{p} = \frac{3000}{2} = 1500$ об/мин, при параллельном включении катушек $n_1 = \frac{3000}{1} = 3000$ об/мин.

Чаще всего двухскоростные двигатели выполняются на 1500/750 об/мин.

Выполняются двигатели также с двумя статорными обмотками. Такие двигатели позволяют получить четыре скорости, например, 1500/1000/750/500 об/мин.

Недостатком этого способа регулирования числа оборотов является ступенчатость изменения скоростей.

Надо иметь в виду, что при постоянном моменте нагрузки на валу двигателя при переключении обмотки статора на меньшее число полюсов (параллельное соединение катушек) с увеличением скорости увеличивается и мощность двигателя, так как

$$P_2 = \frac{Mn_2}{975} [квт].$$

Регулирование скорости двигателей путем переключения числа пар полюсов возможно лишь в двигателе с короткозамкнутым ротором, так как только у этого двигателя число полюсов ротора всегда соответствует числу полюсов статора.

Изменение направления вращения асинхронного двигателя производится переключением любых двух линейных питающих проводов при помощи трехполюсного переключателя.

При таком переключении (перемена местами) двух любых фаз изменится порядок чередования фаз, а следовательно, и направление вращения вращающегося магнитного поля. Ротор двигателя, следуя за вращающимся магнитным полем, также изменит направление своего вращения.

## § 77. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОНТАКТНЫМИ КОЛЬЦАМИ В КАЧЕСТВЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРА С ПОВОРОТНЫМ РОТОРОМ (ПОТЕНЦИАЛ—РЕГУЛЯТОР)

Асинхронный электрический двигатель с контактными кольцами может быть использован для плавного изменения в широких пределах напряжения во вторичной цепи, т. е. в качестве своеобразного автотрансформатора. Для этого ротор двигателя заторма-

живают, а обмотку ротора, соединенную в звезду, включают параллельно обмотке статора (рис. 175). Напряжение питающей сети подводят к точкам параллельного соединения обмоток. Вторичное напряжение снимается с концов обмотки статора. В этом случае обмотка ротора является первичной, а обмотка статора — вторичной. Возможен и обратный случай, когда вторичное напряжение снимается с концов обмотки ротора, а концы обмотки статора соединяются в звезду.

При помощи червячной передачи обеспечивают возможность поворота двигателя под углом до 180 электрических градусов по отношению к обмотке статора.

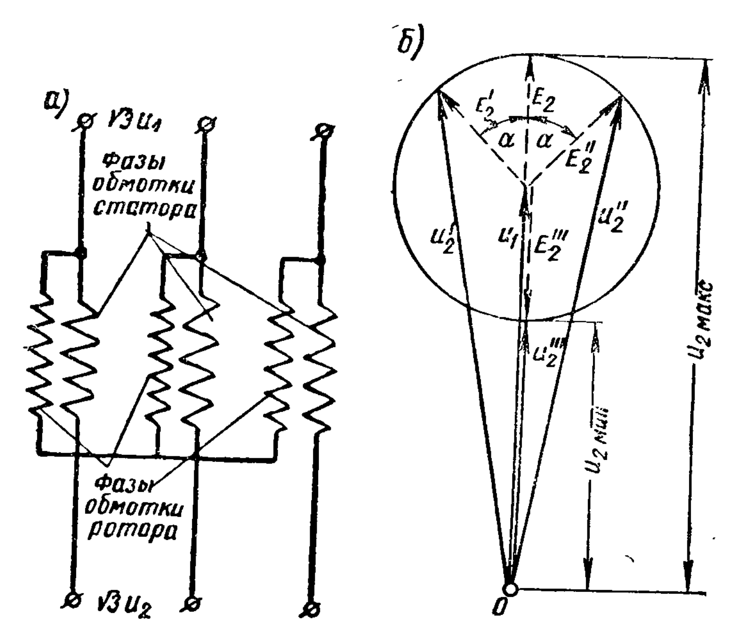



Рис. 175. Потенциал-регулятор:
*а*—принципиальная схема, *б*—векторная диаграмма э. д. с.

При повороте ротора на некоторый угол величина э. д. с. $E_2$ в обмотке статора остается неизменной (независимо от угла поворота), так как она наводится вращающимся магнитным полем, но сдвигается по фазе относительно э. д. с. $E_1$ первичной обмотки (ротора). Результирующее напряжение на зажимах вторичной обмотки будет являться геометрической суммой первичного напряжения и вторичной э. д. с. и будет изменяться в пределах от $U_{2макс}=U_1+E_2$ до $U_{2мин}=U_1-E_2$.

Индукционные регуляторы применяются для регулирования рабочего режима ртутных выпрямителей, изменения режимов при испытаниях трансформаторов (см. рис. 139 и рис. 146) и для других целей.

## § 78. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ СПЕЦИАЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

С целью улучшения пусковых свойств короткозамкнутые роторы асинхронных двигателей иногда выполняются с двойной беличьей клеткой или с глубоким пазом.

Ротор с двойной беличьей клеткой имеет две самостоятельных обмотки (беличьи клетки): внешнюю — с большим активным и

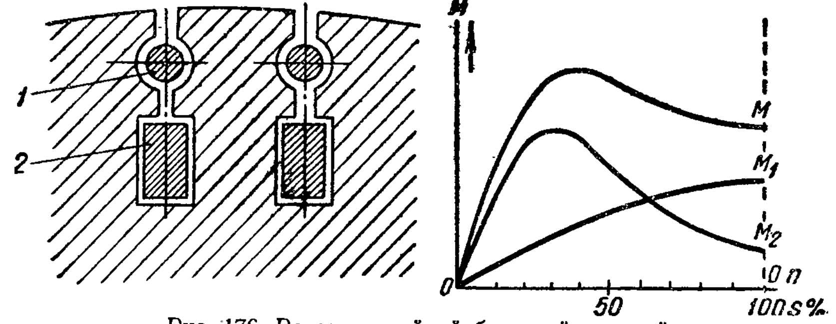



Рис. 176. Ротор с двойной беличьей клеткой:
*1*—пусковая клетка, *2*—рабочая клетка

малым индуктивным сопротивлениями и внутреннюю — с малым активным и большим индуктивным сопротивлениями (рис. 176). Первая обмотка является пусковой, вторая — рабочей. В начале пуска, когда величина скольжения близка к единице, частота тока в роторе близка к частоте сети. Поэтому индуктивное сопротивление рабочей обмотки будет особенно велико при малом активном сопротивлении. Ток в рабочей обмотке будет сильно сдвинут по фазе относительно наведенной в этой обмотке э. д. с. и создавать вращающего момента не будет.

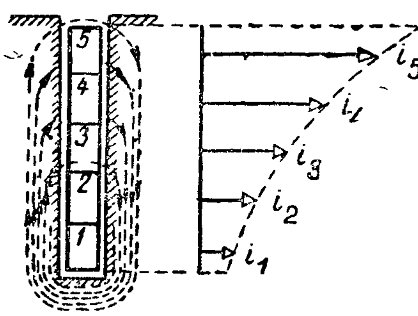



Рис. 177. Ротор с глубоким пазом

В то же время в пусковой обмотке при ее малом индуктивном и большом активном сопротивлении ток практически будет совпадать с наведенной в обмотке э. д. с. и создаст большой вращающий момент $M_1$. По мере увеличения скорости ротора частота тока в роторе уменьшается прямо пропорционально уменьшению скольжения $f_2 = f_1 s$ и индуктивные сопротивления обеих обмоток также будут уменьшаться. При номинальной скорости индуктивные сопротивления будут очень малы и ток практически будет распределяться в обмотках обратно пропорционально их активным сопротивлениям, т. е. почти весь ток будет проходить по рабочей обмотке, создающей момент $M_2$. На валу машины будет создаваться суммарный момент $M$. Недостатки двухклеточного

двигателя является несколько пониженный его $\cos\varphi$ вследствие увеличенного рассеяния рабочей обмотки.

Ротор с глубоким пазом (рис. 177) имеет обмотку в виде высоких узких стержней. При пуске двигателя, когда частота тока в роторе имеет наибольшую величину, возникает явление вытеснения тока.

Магнитные силовые линии потока рассеяния $\Phi_s$, стремясь замкнуться по наиболее короткому пути, создают в пазу неравномерное распределение магнитного потока.

В нижней части паза плотность магнитного потока рассеяния $\Phi_s$ значительно больше, чем в верхней его части.

Наводимая этим магнитным потоком э. д. с. $E_s$ будет в нижних частях проводника больше, а в верхних — меньше. В то же время основной магнитный поток $\Phi$ сцеплен с полным сечением проводника и наводит в нем одинаковую по всему сечению э. д. с. $e$. Так как величина тока в данном случае будет зависеть от разности основной э. д. с. и э. д. с. рассеяния $i=\frac{e-e_s}{r}$, плотность тока в нижней части проводника будет меньше, чем в его верхней части, т. е. ток как бы вытесняется кверху. Вследствие этого уменьшается полезное сечение проводника и увеличивается его активное сопротивление, а, кроме того, в нижней части проводника уменьшается поток рассеяния и индуктивное сопротивление проводника. Отсюда, пусковой ток двигателя с глубоким пазом меньше, чем у обычного асинхронного двигателя, а пусковой момент больше.

По мере увеличения скорости двигателя активное сопротивление проводника уменьшается, а его индуктивное сопротивление растет, и при номинальной скорости двигатель практически работает как обычный асинхронный двигатель.

Таким образом, у асинхронного двигателя с глубоким пазом пусковые характеристики лучше, чем у двигателя нормального исполнения, однако коэффициент мощности $\cos\varphi$ и перегрузочная способность этого двигателя хуже. Это объясняется относительно большим индуктивным сопротивлением его ротора.

В табл. 10 даются пусковые характеристики асинхронных двигателей с двойной клеткой и глубоким пазом.

Таблица 10

| Двигатель нормального исполнения | | Двигатель с двойной клеткой | | Двигатель с глубоким пазом | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\frac{I_{пуск}}{I_н}$ | $\frac{M_{пуск}}{M_н}$ | $\frac{I_{пуск}}{I_н}$ | $\frac{M_{пуск}}{M_н}$ | $\frac{I_{пуск}}{I_н}$ | $\frac{M_{пуск}}{M_н}$ |
| 3,3 | 1,0 | 4,0 | 1,2 | 4,0 | 0,8 |
| 3,7 | 1,5 | 4,8 | 1,5 | 6,0 | 1,0 |
| 5,5 | 2,0 | — | — | 7,0 | 1,2 |

## § 79. ОДНОФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Однофазный асинхронный двигатель состоит из статора с уложенной в его пазы однофазной обмоткой и короткозамкнутого ротора (рис. 178).

При включении двигателя в сеть его ротор остается неподвижным, и только после того, как его искусственно привести во вращение, он будет вращаться с некоторой постоянной скоростью, близкой к синхронной. Это объясняется тем, что однофазный переменный ток создает в обмотке статора пульсирующее магнитное поле (рис. 179, *а*), ось которого сохраняет неизменным свое положение в пространстве. Магнитная индукция в любой точке этого поля изменяется в зависимости от времени по синусоиде.

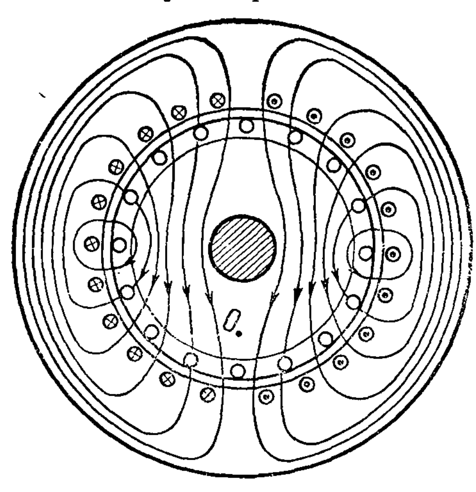



Рис. 178. Схематический разрез однофазного асинхронного двигателя

Как было указано выше, при пуске двигателя ротор остается неподвижным. Это объясняется тем, что пульсирующее магнитное поле можно разложить на два поля, вращающихся в разные стороны с одинаковой угловой частотой.

Пульсирующий поток меняет свое значение от $+\Phi$ до $-\Phi$. Потоки $\Phi_1$ и $\Phi_2$, вращающиеся в разные стороны, имеют половинную амплитуду

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{\Phi}{2}.$$

Поток $\Phi_1$ будем называть прямым, а поток $\Phi_2$ — обратным. Они создают два равных, но противоположно направленных вращающих момента (рис. 179,б). Если ротор привести во вращение, вращающееся магнитное поле, направление вращения которого совпадает с направлением вращения ротора, будет создавать вращающий момент, значительно больший, чем момент обратного вращающегося поля, и будет поддерживать вращение ротора.

Это объясняется тем, что обратное вращающееся магнитное поле будет вращаться относительно ротора почти с двойной скоростью и создаваемые им в роторе э. д. с. и ток будут иметь примерно двойную частоту сети.

Поэтому реактивное сопротивление ротора для такой частоты будет очень большим, в то время как активная слагающая тока

$I_2 \cos \psi_2$ будет очень мала и вращающий момент обратного поля будет практически равен нулю. Величина момента $M$ выражается разностью ординат $M_1$ и $M_2$.

Для пуска однофазных асинхронных двигателей применяют специальные электрические схемы. Например, пуск двигателя осу-

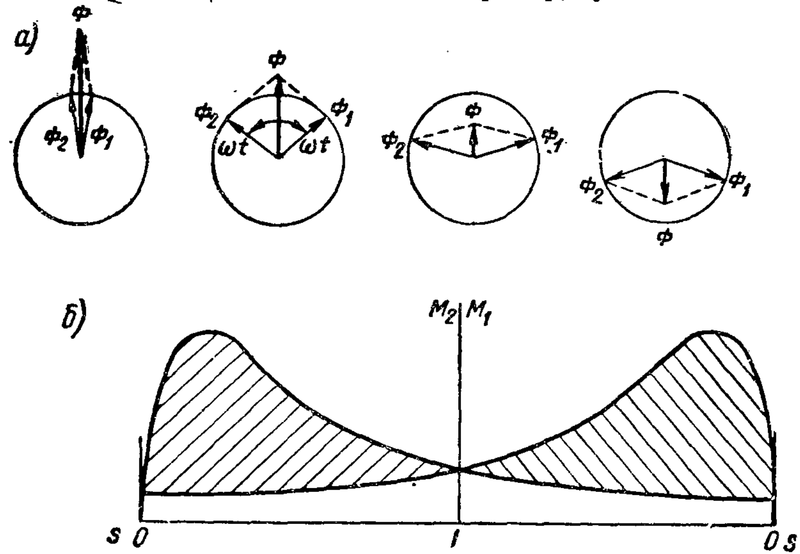



Рис. 179. Пульсирующее поле и вращающий момент однофазного асинхронного двигателя

ществляется путем создания в нем на время пуска двухфазного вращающегося магнитного поля. Для этого в пазы статора закладывается дополнительная пусковая обмотка, сдвинутая в прост-

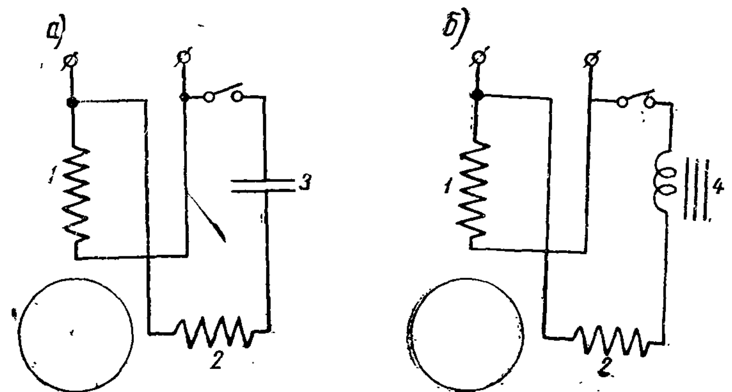



Рис. 180. Пусковые схемы однофазных двигателей:

*а*—схема с емкостью в цепи пусковой обмотки; *б*—схема с индуктивностью в цепи пусковой обмотки; *1*—рабочая обмотка; *2*—пусковая обмотка; *3*—емкость; *4*—индуктивность

ранстве относительно рабочей обмотки на 90 электрических градусов. Чтобы переменные токи в рабочей и дополнительной обмот-

ках были сдвинуты по фазе на 90° и создавали двухфазное вращающееся магнитное поле, последовательно с пусковой обмоткой включают емкость или индуктивность (рис. 180). Пуск такого двигателя осуществляется непосредственным включением его в сеть.

У однофазных двигателей малой мощности с так называемыми расщепленными полюсами на одну половину полюса надевается медное кольцо, играющее роль короткозамкнутого витка. Ток, возникающий в кольце, создает м. д. с., встречную с м.д.с. полюса, что вызывает сдвиг фаз между потоками в половинах полюса. В результате этого создается вращающееся магнитное поле, приводящее во вращение ротор.

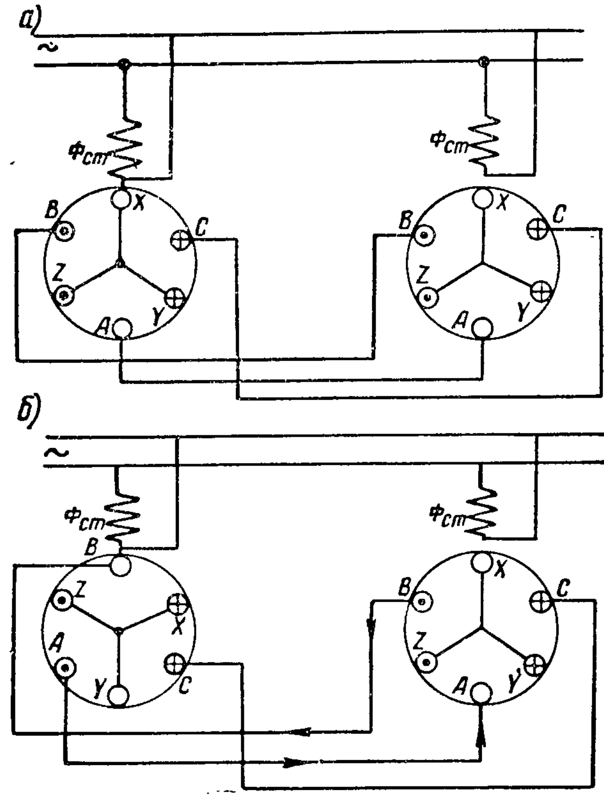



Рис. 181. Схема сельсинов (датчика и приемника)

Однофазные асинхронные двигатели имеют сравнительно низкий коэффициент мощности cos φ и к. п. д. и применяются в специальных схемах, в бытовых приборах и др.

Однофазные асинхронные двигатели специального исполнения, имеющие однофазную статорную обмотку и трехфазную обмотку ротора, широко применяются в схемах автоматического управления и для передачи условных текстов приказаний на расстояние (телеграфы). В этих схемах применяются два однофазных

двигателя, обмотки роторов которых включаются последовательно. Обмотки роторов соединяются каждая в звезду (рис. 181). При одинаковом положении роторов в пространстве токи в их обмотках, будучи направленными встречно, уравновешивают друг друга. В результате этого тока в цепях роторов не будет, и роторы будут неподвижны.

Если же ротор одного из этих двигателей (датчика) сместить в пространстве относительно положения другого ротора на некоторый угол, в цепи роторов возникнет уравнительный ток, который создаст вращающий момент, и ротор другого двигателя (приемника) повернется на тот же угол, при котором токи роторов уравновесятся. Такие двигатели называются сельсинами.

Сельсины могут также иметь трехфазную обмотку статоров, тогда обмотка их роторов делается однофазной.

## § 80. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

В процессе эксплуатации асинхронных двигателей дежурный обслуживающий персонал обязан выполнять все предусмотренные инструкциями операции по включению, выключению и переключению электрических двигателей, подготовке их к работе, обеспечению безотказной работы электрооборудования. В судовых условиях все операции по пуску и остановке электрических машин осуществляются судовыми электриками или лицами, официально их заменяющими. В производственных условиях пуск и остановка двигателей в течение рабочего периода осуществляются производственными рабочими, однако общий надзор за работой электрических двигателей, за их состоянием, исправностью и чистотой сохраняется за дежурными электриками.

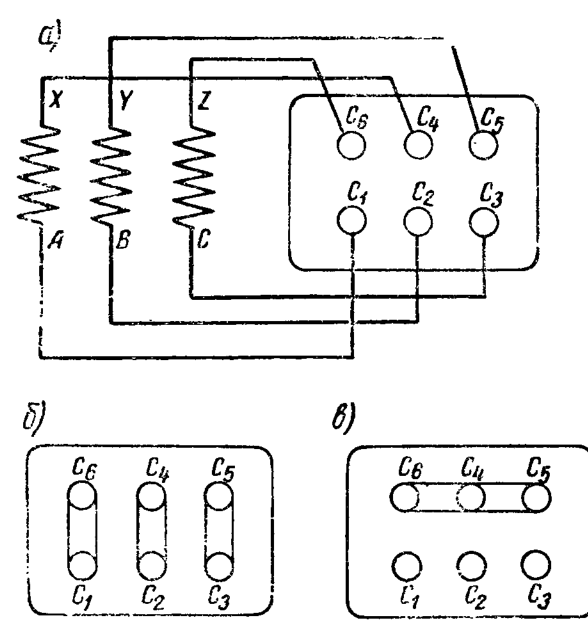



Рис. 182. Схема выводов статорной обмотки: *а*—присоединение выводов: *б*—соединение в треугольник; *в*—соединение в звезду

Асинхронные двигатели включаются в сеть через коробку выводов, к зажимам которой присоединяются выводы статорной обмотки.

Коробка выводов асинхронного двигателя имеет шесть выводов (зажимов), из которых три являются началами фаз и три — их концами.

В зависимости от схемы соединения трехфазной обмотки статора (в звезду или в треугольник) выводы статорной обмотки перемыкаются между собой специальными перемычками, соединительными пластинками (рис. 182). Согласно ГОСТу 183—55 выводы статора имеют буквенные обозначения, приведенные в табл. 7, обозначения выводов ротора даны в табл. 11.

Таблица 11

| Число выводов на контактных кольцах | Названия выводов | Обозначения начала и конца выводов |
|---|---|---|
| 3 | Первая фаза . . . . . . . | Р1 |
| | Вторая фаза . . . . . . . | Р2 |
| | Третья фаза . . . . . . . | Р3 |
| 4 | Первая фаза . . . . . . . | Р1 |
| | Вторая фаза . . . . . . . | Р2 |
| | Третья фаза . . . . . . . | Р3 |
| | Нулевая точка . . . . . . | 0 |

Обозначения выводов обмоток однофазных машин приведены в табл. 12.

Таблица 12

| Число выводов | Название выводов | Обозначения выводов | |
|---|---|---|---|
| | | начало | конец |
| | Обмотки статора асинхронных двигателей: | | |
| 2 | главная обмотка . . . . . . | С1 | С2 |
| 2 | пусковая обмотка . . . . . | П1 | П2 |

Зажимы статорной и роторной обмоток иногда помещаются на одном выводном щитке, например у крановых двигателей. Чаще для выводов статорной и роторной обмоток имеются отдельные выводные коробки.

При обслуживании асинхронных двигателей необходимо прежде всего следить за их чистотой и степенью нагрева отдельных частей машины. Текущий осмотр машин должен производиться по возможности ежедневно, но не реже двух раз в неделю.

Во время текущего осмотра проверяют:

1) нагрев корпусов подшипников (на ощупь);
2) отсутствие посторонних шумов, стука в подшипниках;
3) работу смазочных колец в подшипниках скольжения;
4) уровень масла в подшипниках;
5) плотность затяжки проводов питающей сети в зажимах;
6) общее состояние и чистоту машины.

В случае обнаружения мелких неисправностей их немедленно надо устранять на месте. Дефектная машина должна быть передана в ремонт, а на ее место установлен исправный двигатель той же мощности.

Нагрев отдельных частей электрических машин не должен превышать определенных нормированных значений. ГОСТом 183—55 установлены максимальные значения допускаемых превышений температур для отдельных частей электрических двигателей с изоляцией классов *А* и *В*. Надо иметь в виду, что нормы устанавливают не предельные температуры нагрева, а пределы превышения температуры нагрева частей электрической машины над температурой окружающего воздуха, принятой равной 35° С.

Если температура окружающей среды превышает 35° С, нагрузка двигателей должна быть снижена.

Изоляционные материалы класса А (хлопок, шелк, бумага и другие органические материалы, пропитанные или погруженные в масло) допускают температуру нагрева до 105° С. Большинство современных, не специальных, двигателей имеет изоляцию обмоток класса *А*. Поэтому для обмоток этих двигателей, а также для стальных сердечников и других частей машин, соприкасающихся с обмотками, пределы допускаемых превышений температур установлены 65° С, для подшипников скольжения—45° С, а подшипников качения — 60° С.

Как было указано, температура нагрева внешних частей машины и, в первую очередь, корпусов подшипников при текущих осмотрах определяется на ощупь. Если температура повышена, ее следует измерить термометром.

Подшипники скольжения требуют ежедневного наблюдения за их работой и частого пополнения смазки. В подшипниках скольжения прежде всего надо проверять работу смазочного кольца, которое должно свободно вращаться, не задевая за стенки корпуса, и непрерывно подавать масло к шейке вала. Уровень масла должен систематически пополняться, так как недостаток масла может быть причиной чрезмерного нагрева подшипников. Однако избыток масла также вреден для машины, так как масло, попадая внутрь машины, разъедает изоляцию обмоток.

В подшипниках качения исправность работы проверяется по нагреву и отсутствию посторонних шумов.

Причинами неисправности машин переменного тока могут быть чисто внешние причины, как-то: перегрузка машин, пониженное или повышенное напряжение сети, обрыв питающих проводов, перегорание плавких вставок в предохранителях, неисправность аппаратуры управления, высокая температура внешней среды, загрязнение машин и т. п., а также внутренние причины, связанные с неисправностью ее отдельных частей.

К числу внутренних неисправностей относятся: неисправности обмоток — обрывы, междувитковые соединения, замыкания обмоток на корпус, ошибки в схемах электрических соединений и т. д.;

неисправности щеточного механизма — разрушение поверхности контактных колец, поломка щеток и щеткодержателей, неплотный контакт между щетками и поверхностью контактных колец;

неисправности сердечников статора, ротора, полюсов машины;

неисправности подшипников — их износ, поломка, биение колец;

неисправности валов роторов — износ шейки вала, искривление вала, трещины и др.

Все эти неисправности вызывают неполадки в работе машин и могут быть причинами аварии.

Наиболее характерные случаи аварий с машинами и причины этих аварий следующие.

**Двигатель не идет в ход.** Возможные причины неисправности:

1) обрыв в проводах питающей сети или отсутствие напряжения в сети, что обнаруживается вольтметром или контрольной лампой. Замеры должны производиться на вводных зажимах пусковой аппаратуры, а затем уже на зажимах вводного щитка машины;

2) обрыв в одной из фаз статорной обмотки при схеме соединения обмоток в звезду. Неисправность обнаруживается измерением токов во всех фазах при помощи амперметра. Величины токов во всех фазах должны быть одинаковыми;

3) износ подшипников и прилипание ротора к статору. Эта неисправность определяется замером величин зазоров между ротором и статором в нескольких точках по окружности ротора.

Если двигатель не берет с места под нагрузкой или останавливается при сообщении ему нагрузки, причинами неисправности могут быть:

1) пониженное напряжение, так как момент двигателя пропорционален квадрату напряжения, что обнаруживается путем замера напряжения вольтметром на зажимах вводного щитка;

2) обрыв в одной из фаз статорной обмотки или междувитковые соединения в фазах обмотки. Эта неисправность определяется путем замера амперметром величин токов в фазах обмотки, которые должны быть одинаковыми;

3) неправильное электрическое соединение обмоток статора (в звезду вместо треугольника), что снижает величину пускового момента в три раза.

**Повышенный нагрев отдельных частей машины.** Чаще всего это происходит в результате перегрузки двигателя, повышенного или пониженного напряжения сети, наличия междувитковых соединений в обмотке статора, износа подшипников или недостаточной их смазки и, наконец, из-за неисправности вентиляционной системы.

Перегрузка двигателей устанавливается путем измерения токов обмоток, а наличие междувитковых соединений — по величине токов в отдельных фазах обмотки.

Износ подшипников обнаруживается по наличию посторонних стуков, а также путем замера зазоров между шейкой вала и вкладышем.

**Сильное искрение на контактных кольцах.** Причинами искрения может быть распайка хомутиков в обмотке ротора, повреждения поверхности контактных колец, неисправность щеткодержателей. Все эти неисправности обнаруживаются внешним осмотром.

**Дрожание машины при работе.** Причинами чрезмерного дрожания машины могут быть: нарушение балансировки ротора, искривление шейки вала, износ подшипников.

Все эти неисправности установить на месте сложно, поэтому машину следует направить для проверки в электроремонтный цех. Эксплуатировать такую машину нельзя, так как чрезмерное дрожание вызывает разрушение фундамента, быстрый износ подшипников и может вызвать более серьезные неисправности как электрической машины, так и исполнительного механизма.

## *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. На каком принципе основана работа асинхронных двигателей?
2. Как получается вращающееся магнитное поле? Какова скорость его вращения?
3. Что характеризует скольжение и как оно связано с числом оборотов двигателя?
4. Что называется синхронным числом оборотов двигателя и какое число оборотов называется асинхронным?
5. Чему равна частота тока в роторе и как она связана с частотой тока в статоре?
6. Как устроен короткозамкнутый ротор?
7. Как устроен ротор с контактными кольцами?
8. Какое отношение существует между э.д.с. статора и ротора?
9. В чем общность электромагнитных процессов, происходящих в трансформаторе и асинхронном двигателе?
10. Как строится векторная диаграмма асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
11. На каком принципе работает индукционный регулятор (потенциал-регулятор)?
12. Какие процессы происходят в асинхронном двигателе при его работе под нагрузкой?
13. Чему равен ток во вращающемся роторе?
14. Чему равен ток в статоре?
15. Как строится векторная диаграмма для асинхронного двигателя при его номинальной нагрузке?
16. Чему равен вращающий момент асинхронного двигателя?
17. От каких величин зависит вращающий момент двигателя? Какова зависимость вращающего момента от скольжения?
18. Какова механическая характеристика асинхронного двигателя?
19. Какие потери имеют место в асинхронном двигателе?
20. Чему равен к.п.д. асинхронного двигателя?
21. Какие явления происходят при пуске асинхронного двигателя?
22. Какие имеются специальные схемы пуска двигателей с короткозамкнутым ротором?
23. Почему повышается вращающий момент при пуске двигателя с контактными кольцами посредством пускового реостата?

24. Что определяет кратность пускового момента и какова ее величина для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и контактными кольцами?

25. Как можно регулировать число оборотов асинхронных двигателей?

26. Как работает однофазный асинхронный двигатель?

27. Что такое сельсин и как он работает?

28. Как обозначаются выводы статорных и роторных обмоток на щитке выводов и как замыкаются зажимы выводов при включении обмоток в звезду и в треугольник?

29. Какие операции проводятся обслуживающим персоналом в процессе эксплуатации асинхронных двигателей?

30. Каковы основные неисправности электрических машин переменного тока?

31. Как определяются обрыв и междувитковые соединения в обмотках машин?

32. Почему двигатель может не развивать номинальное число оборотов?

33. Каковы могут быть причины чрезмерного нагрева отдельных частей электрических машин?

*Глава X*

# ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА

## § 81. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

В настоящее время наиболее широкое распространение имеет трехфазный переменный ток. Этот ток получает широкое применение и на речных судах. Между тем для большого числа электрических установок и установок связи необходим постоянный ток.

В отдельных случаях может быть и обратная необходимость в преобразовании постоянного тока в переменный.

Преобразование одного рода тока в другой возможно при помощи вращающихся преобразователей и статических устройств.

Вращающиеся преобразователи являются электрическими машинами, генерирующими во вторичную сеть постоянный или переменный ток, в зависимости от необходимости. К вращающимся преобразователям относятся: двигатель-генератор и одноякорный преобразователь.

Преобразование переменного тока в постоянный возможно также статистическими преобразователями.

К статическим преобразователям относятся: электронно-вакуумные и ионные преобразователи, а также различные выпрямители.

## § 82. ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР

Двигатель-генератор представляет собой агрегат, состоящий из двух электрических машин (двигателя и генератора), соединенных между собой муфтой (рис. 183).

В качестве двигателя обычно используются трехфазные асинхронные двигатели или при значительной мощности агрегата — синхронные двигатели, обладающие более высоким коэффициентом мощности и к. п. д.

В качестве генераторов применяются генераторы постоянного тока с параллельным или смешанным возбуждением. Обе машины электрически независимы друг от друга, что позволяет в широких пределах регулировать напряжение во вторичной цепи и менять направление тока в ней.

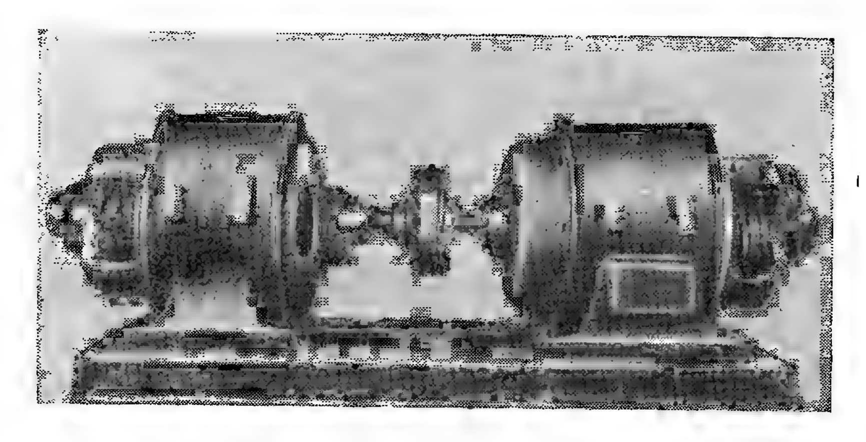


Рис. 183. Двигатель-генератор

Это свойство двигатель-генератора широко используется в судовых электрических приводах в схемах генератор-двигатель (Г-Д).

При комплектовании агрегата необходимо, чтобы мощность двигателя была несколько больше мощности генератора, что связано с общим к. п. д. установки.

Недостатком двигатель-генератора является значительная стоимость и сравнительно низкий к. п. д.

Если обозначить полную мощность двигателя $P_{д1}$, мощность, развиваемую на его валу, $P_{д2}$, мощность, развиваемую генератором, $P_г$, то

к. п. д. двигателя равен

$$\eta_д = \frac{P_{д2}}{P_{д1}};$$

к. п. д. генератора равен

$$\eta_г = \frac{P_г}{P_{д2}};$$

к. п. д. двигатель-генератора равен

$$\eta_{дг} = \frac{P_г}{P_{д1}} = \frac{P_{д2}\eta_г}{\frac{P_{д2}}{\eta_д}} = \eta_д \eta_г.$$

Таким образом, к. п. д. агрегата равен произведению к. п. д. двигателя и к. п. д. генератора. Если, например, к. п. д. двигателя равен 0,85, а генератора 0,83, общий к. п. д. агрегата будет равен $\eta_{дг} = 0{,}71$.

Двигатель-генераторы применяются не только для преобразования переменного тока в постоянный, но и для преобразования постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения, например для питания анодных цепей радиостанций. В этом случае в качестве двигателя применяется двигатель постоянного тока.

## § 83. ОДНОЯКОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Одноякорный преобразователь представляет собой электрическую машину, в которой совмещены синхронная машина и машина постоянного тока. Она имеет обмотку якоря и обмотку возбуж-

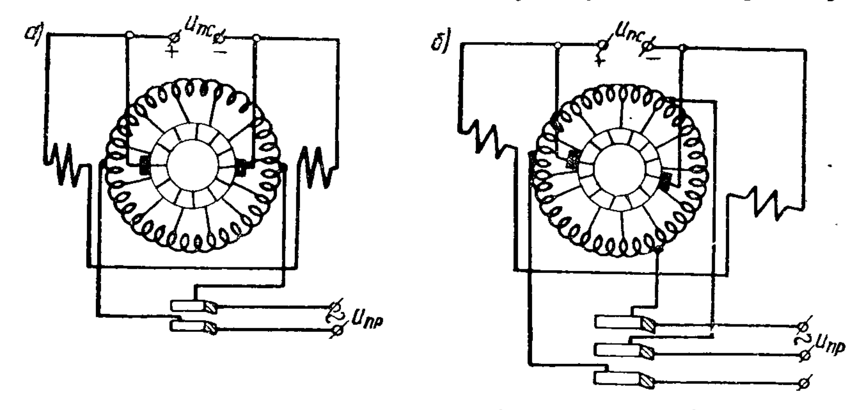



Рис. 184. Схема одноякорного преобразователя однофазного и трехфазного тока

дения. От секций обмотки якоря, как и у обычных машин постоянного тока, делаются выводы к коллектору. Одновременно от якорной обмотки подводятся выводы и к контактным кольцам. Если это машина однофазного тока (рис. 184,*а*), она имеет два контактных кольца, к которым подводятся выводы от двух диаметрально противоположных точек обмотки. Если это одноякорный преобразователь трехфазного переменного тока (рис. 184,*б*), он имеет три контактных кольца, и выводы к ним делаются от трех точек обмотки, смещенных друг относительно друга на 120° по окружности. При этом якорную обмотку можно рассматривать как трехфазную обмотку, соединенную в треугольник. Если преобразователь подключить к сети переменного тока, он будет работать со стороны переменного тока как синхронный двигатель, а со стороны постоянного тока — как генератор постоянного тока. Наоборот, если к щеткам коллектора подвести постоянный ток, в обмотке якоря будет наводиться переменная э. д. с. и в сети со

стороны контактных колец будет действовать переменное напряжение.

Напряжения постоянного и переменного токов находятся между собой в определенном соотношении, так как обе части машины имеют общие обмотки якоря и возбуждения. Величина действующего напряжения постоянного и переменного токов может быть определена по многоугольнику э. д. с. (рис. 185). Изображая э. д. с. в активных проводниках, заложенных в пазах, векторами и

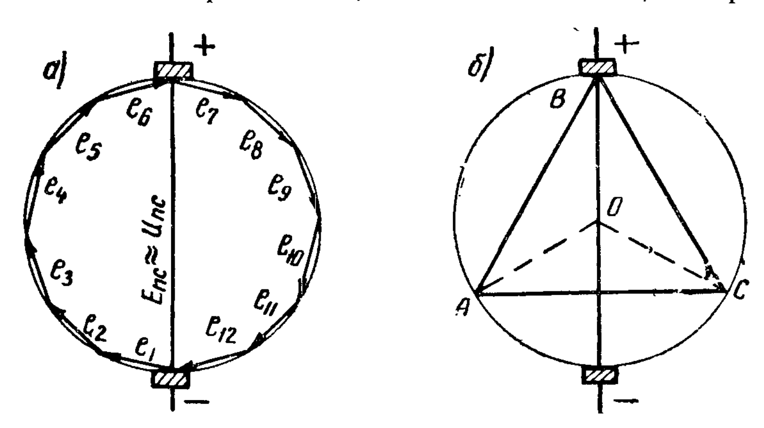



Рис. 185. Диаграмма э.д.с.

*а*—однофазного преобразователя; *б*—трехфазного преобразователя

геометрически складывая эти векторы между собой, получим многоугольник с количеством сторон соответственно количеству пазов (рис. 185,*а*). При большом количестве пазов этот многоугольник приближается к кругу. Суммарная э. д. с. между щетками определится диаметром круга. Действующее значение э. д. с. при наличии двух колец (однофазный ток) будет равно

$$E_{nc}=E_{np}\sqrt{2};\ E_{np}=\frac{E_{nc}}{\sqrt{2}}=0{,}707E_{nc}\approx 0{,}707U_{nc},$$

где:

$E_{nc}$ и $U_{nc}$ — соответственно э. д. с. и напряжение постоянного тока в *в*;

$E_{np}$ и $U_{np}$ — соответственно действующие значения э. д. с. и напряжения однофазного переменного тока. При переменном трехфазном токе действующие значения э. д. с. и напряжения (рис. 185, *б*) из треугольника *АОВ* буду равны

$$E_{np}\approx U_{np}=\frac{E_{nc}}{2}\cdot\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}=0{,}613E_{nc}.$$

Величину переменного тока можно определить из соотношения мощностей со стороны переменного и постоянного токов.

Если пренебречь потерями, можно считать, что $P_{nc} \approx P_{np}$. Тогда при $\cos\varphi = 1$.

$$P_{nc} = U_{nc} I_{nc}; \quad P_{np} = m U_{\phi} I_{\phi}.$$

Откуда

$$U_{nc} I_{nc} = m U_{\phi} I_{\phi}.$$

Из треугольника $AOB$ получим

$$\frac{I_{\phi}}{I_{nc}} = \frac{U_{nc}}{m U_{\phi}} = \frac{E_{nc}}{m E_{\phi}} = \frac{\sqrt{2}}{m \sin \frac{\pi}{m}}$$

или

$$I_{\phi} = \frac{\sqrt{2} I_{nc}}{m \sin \frac{\pi}{m}}. \tag{215}$$

Фазные и линейные напряжения равны между собой, а линейный ток равен геометрической разности фазных токов, так как для трехфазного переменного тока обмотка якоря представляет соединение в треугольник.

При числе фаз $m$ между фазными и линейными токами существует соотношение

$$I_{\phi} = \frac{I_{л}}{2 \sin \frac{\pi}{m}}. \tag{216}$$

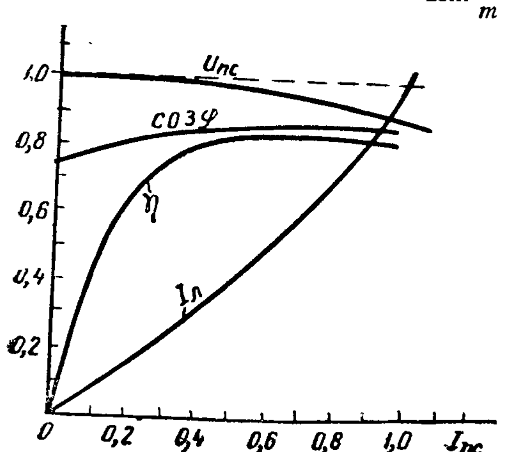



Рис. 186. Рабочие характеристики одноякорного преобразователя

Из уравнений (215) и (216) получим

$$I_{\phi} = \frac{I_{л}}{2 \sin \frac{\pi}{m}} = \frac{\sqrt{2} I_{nc}}{m \sin \frac{\pi}{m}},$$

или

$$I_{л} = \frac{2\sqrt{2} I_{nc}}{m}. \tag{217}$$

При трехфазном токе ($m=3$) $I_{л} = 0{,}943 I_{nc}$.

Рабочие характеристики одноякорного преобразователя даны на рис. 186. Они представляют собой зависимости напряжения постоянного тока $U_{nc}$, линейного переменного тока $I_{л}$, коэффициента мощности $\cos\varphi$ и к. п. д. от тока в якоре $I_{nc}$ при $U_{np} = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

Как видно из характеристик, напряжение постоянного тока при изменении нагрузки меняется незначительно. Это объясняется тем, что результирующий ток в обмотке якоря представляет собой разность встречно направленных переменного и постоянного токов. Как следствие этого, у одноякорных преобразователей — малая реакция якоря, незначительные потери мощности и падение напряжения, устойчивое напряжение и хороший к. п. д.

## § 84. ГАЗОТРОННЫЕ И ТИРАТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Газотрон является ионным прибором. Он представляет собой двухэлектродную неуправляемую лампу с металлическим или угольным анодом и металлическим катодом. Баллон лампы заполнен парами ртути или инертным газом (криптон, неон, гелий) при давлении 0,01—0,001 *мм* рт. ст. Работа газотрона основана на явлении термоэлектронной эмиссии, т. е. способности раскаленных металлов излучать в пространство свободные электроны. При наличии положительно заряженного анода вылетающие из раскаленного катода электроны под действием электрического поля, существующего в пространстве между анодом и катодом, притягиваются анодом и создают в анодной цепи ток.

Работа газотрона протекает следующим образом. Вылетающие с большой скоростью из катода электроны сталкиваются на своем пути с атомами паров ртути и ионизируют их, т. е. выбивают из них вторичные электроны, тем самым превращая их в положительные ионы. Положительные ионы ртути стремятся к катоду и по пути восстанавливаются в нейтральные молекулы, забирая электроны из электронного облачка вокруг катода.

В результате ионизации, связанной с включением в общий электронный поток дополнительных электронов, выбитых из атомов ртути или инертных газов, и нейтрализацией пространственного отрицательного заряда, анодный ток газотронов значительно больше, чем у кенотронов. Внутреннее сопротивление газотронов невелико и не превышает нескольких десятков *ом*, падение напряжения не превышает 10—20 *в*.

Работа газотрона определяется его вольтамперной характеристикой (рис. 187). При малых положительных потенциалах на аноде ток в газотроне сначала будет очень мал, так как ионизация еще не наступила. Ионизация наступает при напряжении порядка 10 *в*, которое называется напряжением зажигания. Рабочим участком характеристики является ее прямолинейная часть *А-В*, которая и определяет диапазон мгновенных значений тока, составляющего для выпрямителей малой мощности от 0,01 до 0,3 *а*, а для мощных выпрямителей до 15 ÷ 150 *а*. При выбранном режиме работы ток не должен превышать величины тока насыщения катода (точка *В*) во избежание распыления катода и порчи газотрона.

Зажигание газотрона сопровождается голубовато-фиолетовым свечением, что соответствует второй стадии ионизации, когда при

столкновении электронного потока с атомами ртути или газа электроны из атомов еще не выбиваются, а лишь меняют орбиту своего движения. Приобретаемый атомом при столкновении с электронами кинетический запас энергии возвращается им в виде кванта света. На этой стадии ток резко возрастает, что видно из кривой. Дальнейшее увеличение анодного напряжения $U_a$ нарастания тока в анодной цепи не дает. Последовательно с газотроном обязательно включается нагрузочное сопротивление, так как

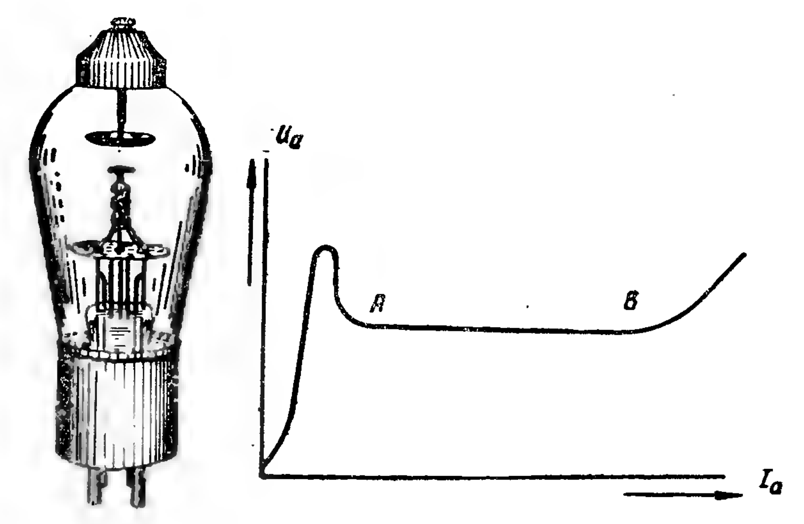



Рис 187. Газотрон и его вольтамперная характеристика

при его отсутствии к аноду газотрона будет приложено полное анодное напряжение, что при малом внутреннем сопротивлении газотрона может вызвать в нем образование дугового разряда.

Напряжение на катоде должно поддерживаться постоянным, и его колебание не должно превышать $+10 \div -5\%$.

При значительном понижении напряжения накала пространственный заряд нейтрализуется положительными ионами не полностью, падение напряжения между анодом и катодом возрастает, что сообщает положительным ионам большую скорость, и они, с силой бомбардируя катод, разрушают его.

При включении газотрона сначала включают напряжение накала и лишь после прогрева катода — анодное напряжение. Выключение производится в обратном порядке.

Ионный процесс, происходящий в газотроне, может вызвать возникновение обратного тока, создаваемого положительно заряженными ионами. При понижении анодного напряжения до нуля нейтрализация положительно заряженных ионов происходит не сразу, а в течение некоторого промежутка времени порядка $0{,}0001 \div 0{,}00001$ сек. В это время ионы начинают двигаться уже в обратном направлении — в сторону отрицательно заряженного

анода. При большом потенциале может возникнуть явление «обратного зажигания» в виде дуги.

Катоды у ртутных газотронов небольшой мощности обычно делаются оксидными прямого накала (никелевая или платиновая проволока, покрытая окисями металлов бария, стронция или кальция).

Анод изготовляется в виде диска из никеля, а у газотронов большой мощности — полушаровой формы из графита. Вывод от анода делается в верхней части лампы. Цоколь газотрона обычно резьбовой, как у ламп накаливания.

Накал катода производится от постороннего источника тока или от сети через специальный трансформатор. Напряжение накала газотрона составляет $1 \div 6{,}3$ *в*.

Газотроны подразделяются по роду наполнения баллона газотрона (ртутные пары или инертный газ), по числу анодов (одно- и двуханодные), по конструкции анода (закрытый или открытый), по величине амплитуды анодного напряжения (низковольтные, нормальные и высоковольтные).

Достоинством газотрона является малая зависимость падения напряжения от размеров его электродов, что позволяет делать газотроны малых размеров.

К недостаткам газотронов относится:

1) большая чувствительность к перегрузкам;

2) необходимость предварительного подогрева катода, который из-за большой его массы раскаляется в течение от 2 до 20 мин., в зависимости от размеров газотрона;

3) зависимость устойчивости работы газотрона от температуры окружающей среды, так как при температуре воздуха вокруг газотрона выше 30—40° С может возникнуть явление обратного зажигания.

Газотроны являются неуправляемыми приборами. Газотроны, снабженные третьим электродом — сеткой, называются **тиратронами**. Название этого прибора происходит от греческого слова «тира», что означает дверь.

В отличие от трехэлектродных электронных ламп — триодов сетка в газотроне не может управлять анодным потоком. С помощью этой сетки можно лишь управлять моментом зажигания тиратрона.

Чем выше отрицательный потенциал на сетке, тем при более высоком положительном потенциале на аноде зажигается тиратрон.

После зажигания (рис. 188) изменение потенциала на сетке никакого влияния на величину анодного тока не оказывает, так как вследствие отрицательного потенциала на сетке вокруг нее скопляются положительные ионы и покрывают ее плотной ионной оболочкой, нейтрализуя ее действие.

Катод и анод тиратрона устроены так же, как и у газотрона. Сетка полностью охватывает катод, поэтому весь электронный

поток, направляясь к аноду, проходит сквозь щели в сетке. Тиратроны в отличие от газотронов обычно имеют четырех- или восьмиштырьковый цоколь.

Так же как и у газотронов, баллон тиратрона заполняется либо парами ртути, либо инертными газами (аргоном, неоном).

В отличие от газотронов тиратроны чаще всего делаются двуханодными. Нормальное напряжение на аноде у зажженного тиратрона в зависимости от его типа составляет 10—30 *в*.

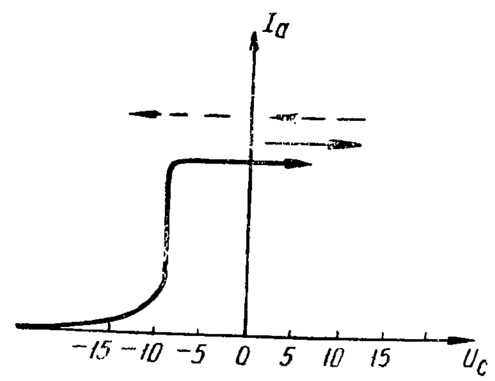


Рис. 188. Зависимость анодного тока тиратрона от сеточного напряжения

При использовании тиратрона в качестве выпрямителя переменного тока на анод тиратрона подается переменный потенциал. Назначением сетки является — обеспечивать зажигание дуги при положительном полупериоде на аноде и предотвращать возможность возникновения дугового разряда в остальное время.

На сетку также подается переменное напряжение той же частоты, как и на аноде.

Если сеточное напряжение по фазе совпадает с анодным напряжением, тиратрон будет работать как нормальный выпрямитель. Если же при помощи индукционного регулятора между сеточным и анодным напряжениями создать сдвиг фаз, определяемый углом ψ, дуговой разряд при положительном потенциале на аноде возникнет не сразу, а с некоторым запозданием, когда сеточное напряжение станет равно или будет меньше напряжения зажигания. Угол в данном случае называется углом з а п а з д ы в а н и я з а ж и г а н и я. Время запаздывания зажигания и среднее значение величины выпрямленных тока и напряжения зависят от величины угла запаздывания зажигания ψ.

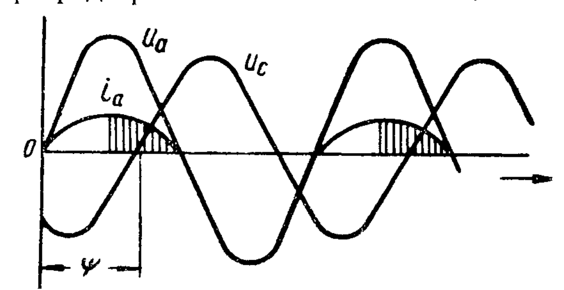


Рис. 189. Кривые тока и напряжения тиратрона

На рис. 189 заштрихованная площадь кривых характеризует время и среднюю величину выпрямленных тока и напряжения при угле ψ. При угле ψ = 180° тока во внешней цепи не будет, так как

тиратрон будет заперт в результате большого отрицательного потенциала на сетке лампы.

Таким образом, изменяя величину угла сдвига фаз между анодным и сеточным напряжением, можно регулировать величину среднего значения выпрямленных тока и напряжения.

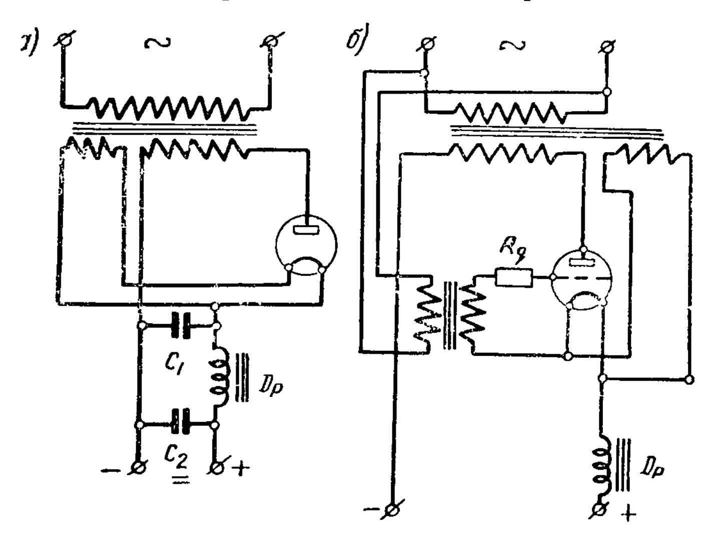



Рис. 190. Схемы включения:
*а*—газотрона; *б*—тиратрона

На рис. 190 приведены схемы включения газотрона и тиратрона в сеть.

## § 85. РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Ртутные выпрямители относятся также к числу ионных приборов. Различают стеклянные и металлические ртутные выпрямители. Они выполняются однофазными и многофазными.

Однофазный стеклянный ртутный выпрямитель состоит из стеклянной колбы, имеющей высокий вакуум (порядка 0,001 *мм* рт. ст.), положительных электродов и катода (рис. 191). Катодом ртутного выпрямителя является ртуть, налитая в нижнюю часть колбы и соединяющаяся с внешней цепью через металлический электрод, впаянный в лампу. Положительными электродами — анодами являются цилиндрические стальные или графитовые электроды $A_1$ и $A_2$, расположенные в стеклянных трубках колбы — анодных рукавах. Для зажигания ртутного выпрямителя служит дополнительный электрод — анод зажигания $A_5$. Для поддержания катодного пятна в раскаленном состоянии при уменьшении нагрузки в выпрямителе имеются еще два вспомогательных электрода — аноды возбуждения $A_3$ и $A_4$.

На этом же рисунке показана схема включения однофазного ртутного выпрямителя. Выпрямитель получает питание от сети переменного тока через трансформатор Тр. Аноды $A_1$ и $A_2$ подключаются к концам его вторичной обмотки.

Аноды возбуждения $A_3$ и $A_4$ получают питание от вспомогательного трансформатора $Тр_в$, средняя точка которого подключается к катоду. Пусковой анод $A_5$ через реостат соединяется с одним из концов вторичной обмотки трансформатора $Тр_в$. Внешняя цепь (выпрямленного тока) подключается с одной стороны к катоду выпрямителя (через дроссель), с другой стороны — к средней точке вторичной обмотки трансформатора.

Рис. 191. Схема однофазного ртутного выпрямителя

Для зажигания выпрямителя нажимают пусковую кнопку ПК и наклоняют выпрямитель в сторону пускового анода с тем, чтобы ртуть катода пришла в соприкосновение с ртутью пускового анода. При этом образуется замкнутая электрическая цепь: вторичная обмотка вспомогательного трансформатора $Тр_в$ — сопротивление R — пусковая кнопка — пусковой анод — ртуть — катод — средняя точка вспомогательного трансформатора. По цепи пойдет ток. При возвращении выпрямителя в вертикальное положение ртутный мостик разрывается. Возникшая при его разрыве искра (дуга), являющаяся потоком электронов, оказывается достаточной для того, чтобы вызвать образование на поверхности катода светящегося катодного пятна с температурой до 2000° С. Это пятно является источником эмиссии электронов. В результате эмиссии электронов образуется дуга между катодом и анодами возбуждения, а при подключении внешней цепи — и между катодом и главными анодами выпрямителя. Для устойчивой работы выпрямителя необходимо, чтобы по внешней цепи протекал ток

не менее 4—5 *а*. При меньших значениях тока (ниже 2,5 *а*) дуга гаснет. Для ее поддержания при неблагоприятных условиях работы и служат аноды возбуждения $A_3$ и $A_4$.

Дроссель во внешней цепи предназначен для сглаживания формы кривой выпрямленного тока. Физический процесс работы выпрямителя заключается в следующем.

Когда на аноде создается положительный потенциал, поток электронов, излучаемый светящимся пятном катода, устремляется к этому аноду. Скорость движения электронов тем выше, чем больше потенциал анода. Поток электронов на своем пути сталкивается с атомами ртути, которая заполняет своими порами колбу. При относительно малой скорости движения электронов при их столкновении с атомами ртути возникает упругий удар, под действием которого атомы только меняют траекторию своего движения. При большой скорости электронов имеет место уже неупругий удар, вызывающий возбуждение атомов, которое сопровождается приближением содержащихся в нем электронов к его поверхности. Это возбуждение исчезнет через $\frac{1}{10^8}$ сек., полученный же атомом запас энергии при столкновении с электроном выделяется в виде кванта света. Поэтому работа выпрямителя сопровождается свечением.

Наконец, при большой скорости электронов наступает ударная ионизация, когда в результате столкновения с электроном из атома ртути выбиваются вторичные электроны.

Эти электроны включаются в общий поток электронов. Положительные ионы устремляются к катоду и, с одной стороны, уравновешивают пространственый заряд у катода, усиливая этим эмиссию электронов, с другой стороны, бомбардируя катод, способствуют поддержанию высокой температуры светящегося катодного пятна.

Работа ртутного выпрямителя характеризуется его вольтамперной характеристикой (рис. 192).

Как видно из этой характеристики, при малых напряжениях процесс ионизации не возникает и через выпрямитель проходит только электронный ток. Ионизация начнется при некотором положительном потенциале, равном напряжению ионизации. Начиная с этого момента, электронный разряд переходит в дуговой и между электродами устанавливается незначительное падение напряжения $\Delta U_a$, остающееся неизменным.

На анодах создается попеременно то положительный, то отрицательный потенциалы, соответствующие положительным и отрицательным полупериодам тока, так как на них подается переменное напряжение. При наличии двух анодов в то время, как на одном аноде создается отрицательный потенциал, на другом будет положительный потенциал и наоборот.

Поэтому все время на том или другом аноде имеется положительный потенциал. Дуга горит беспрерывно, перебрасываясь с

одного анода на другой, имеющий в данный момент положительный потенциал.

Таким образом, работа выпрямителя происходит по двухполупериодной схеме, что способствует уменьшению пульсации выпрямленного тока.

Достоинствами ртутных выпрямителей являются:

1) возможность получения выпрямленного тока значительной мощности;

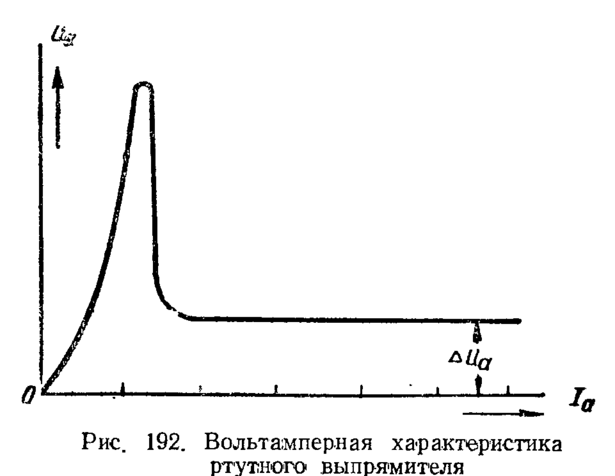



Рис. 192. Вольтамперная характеристика ртутного выпрямителя

2) сравнительно высокий коэффициент полезного действия (до 85—90%);

3) большой срок службы.

Недостаток состоит в большой чувствительности к перегрузкам.

Ртутные выпрямители являются основой современного электрифицированного транспорта. Они широко применяются в промышленности, когда для технологических процессов необходим постоянный ток, для зарядки аккумуляторов, в установках связи и т. д. На судах они не применяются.

## § 86. ТВЕРДЫЕ (ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ) ВЫПРЯМИТЕЛИ

Полупроводниковые выпрямители получают все большее применение в самых различных отраслях техники, где требуется постоянный ток. По сравнению с машинными и ионными выпрямителями они обладают целым рядом технико-экономических преимуществ. Они могут применяться в широком диапазоне мощностей и всегда готовы к действию.

Действие полупроводниковых выпрямителей основано на их свойстве разной проводимости в прямом и обратном направлении.

Элемент полупроводникового выпрямителя состоит из двух электродов, между которыми помещается тонкий непроводящий слой (толщиной около $10^{-5}$ *мм*), называемый запирающим. Одним

из электродов элемента является металлическая пластина, другим — полупроводник. Физические процессы, протекающие в полупроводниковых выпрямителях, достаточно сложны, поэтому, не вдаваясь в подробности, отметим лишь, что, если со стороны полупроводника приложить положительный потенциал, свободные электроны с проводника под действием электрического поля будут проникать через запирающий слой в полупроводник и по замкнутой внешней цепи, подключенной к обоим электродам, будет проходить электрический ток. Если же со стороны полупроводника приложить отрицательный потенциал, а со стороны металлического электрода — положительный, сопротивление запирающего слоя окажется столь велико, что тока практически во внешней цепи не

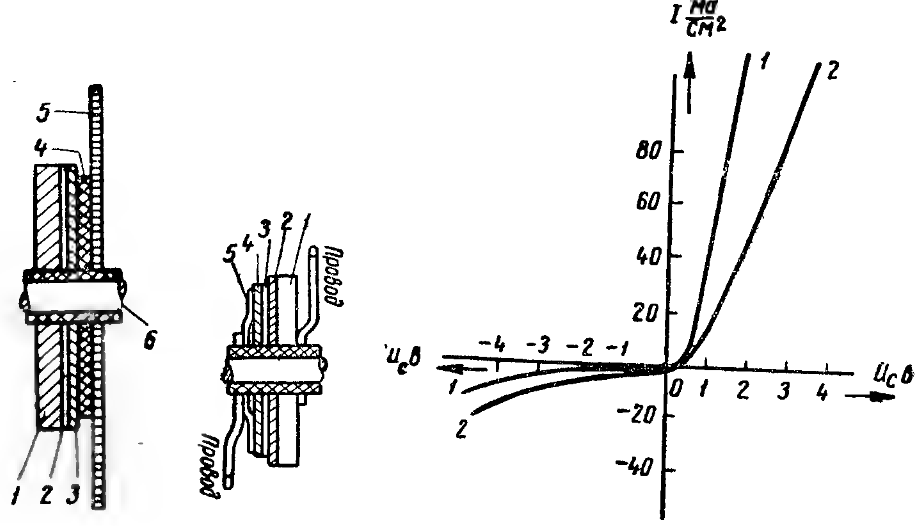



Рис. 193. Устройство медно-закисного выпрямителя

Рис. 194. Устройство селенового выпрямителя

Рис. 195. Вольтамперные характеристики выпрямителей:
1—селенового; 2—медно-закисного

будет. Это свойство запирающего слоя оказывать разное сопротивление электрическому току в прямом и обратном направлениях называется **вентильным свойством**, а выпрямительный элемент в сборе — **вентильным элементом** или **вентилем**.

Таким образом, полупроводниковые выпрямители обладают односторонней проводимостью, и ток, возникающий во внешней цепи, когда к полупроводнику приложен положительный потенциал, имеет одно постоянное направление.

В настоящее время наибольшее распространение имеют полупроводниковые выпрямители трех типов: медно-закисные или купроксные, селеновые и германиевые.

Медно-закисные элементы (рис. 193) состоят из: медного диска *1*, отделенного запирающим слоем *2* от слоя закиси меди *3*.

Для лучшего контакта к слою закиса меди $Cu_2O$ прилегает свинцовый диск *4*, а за ним, со стороны внешней цепи, располагается тонкий медный диск— радиатор *5*, служащий для отвода теплоты, выделяемой током в элементе.

Отвод теплоты совершенно необходим, так как при температуре свыше 50° запирающий слой теряет свои вентильные свойства. Запирающий слой создается в процессе образования закиси меди. Закись меди получается при прокаливании медной пластинки при температуре 1040—1080° с последующим быстрым ее охлаждением в кипящей воде. Отдельные элементы монтируются на специальном болтике *6*, изолированном от составных частей элемента. Группа элементов, собранная на болтике, называется выпрямительным столбиком.

Селеновые выпрямители (рис. 194) состоят из: стального диска *1*, опорного электрода, покрытого с одной стороны полупроводящим слоем селена *2*, напыленного на селен слоя из сплава олова, кадмия и висмута *4*, являющегося вторым электродом, и пружинящей контактной шайбы *5*. При формовке элемента электрическим током между слоем селена и сплава образуется запирающий слой *3*. Направление тока в селеновом элементе — от опорного электрода через селен и запирающий слой ко второму электроду — составному сплаву.

На рис. 195 даны вольтамперные характеристики медно-закисного и селенового выпрямителей, показывающие зависимость между прямым и обратным током при разных потенциалах.

Отношение сопротивления элемента в прямом и обратном направлениях называется статическим коэффициентом выпрямления.

$$k_{ст} = \frac{r_{обр}}{r_{пр}}.$$

Чем больше это отношение, тем лучше действие выпрямителя.

Допустимое напряжение на один медно-закисный элемент 3—5 *в*, на один селеновый элемент 20—30 *в*. При бóльших значениях напряжения запирающий слой элементов пробивается и теряет свое свойство односторонней проводимости.

Для работы при более высоких напряжениях элементы соединяются последовательно в батареи.

Селеновые выпрямители имеют бóльший статический коэффициент выпрямления, чем медно-закисные, но работают они менее устойчиво, так как формовка их запирающего слоя продолжается и при работе выпрямителя.

Для получения выпрямленного тока элементы собираются в специальные электрические схемы. На рис. 196 показана однополупериодная схема. В однополупериодной схеме используется только один положительный полупериод переменного тока. Ток получается прерывистый с частотой переменного тока.

В двухполупериодной схеме (рис. 197) применяется трансформатор, у которого используется средняя (нулевая) точка вторичной обмотки. В одной половине обмотки наводится э. д. с. $e_2$, а в другой половине — $e'_2$. На рисунке приведены графики мгновенных значений этих э. д. с. В каждый отдельный момент времени

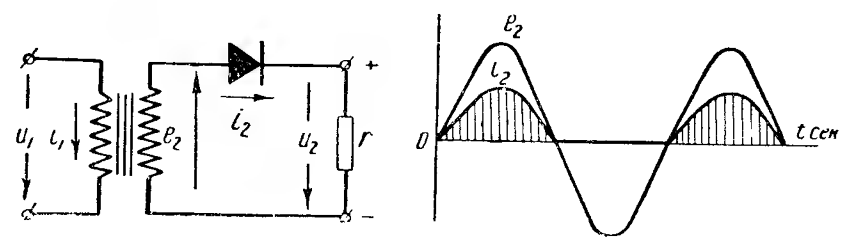



Рис. 196. Однополупериодное выпрямление

ток будет проходить через тот вентиль, который в данный момент оказывается подключенным своим анодом к положительному потенциалу вторичной обмотки. Нетрудно видеть, что через нагрузку ток будет течь в одном направлении в любой момент, независимо от того, какой вентиль является проводящим. В технике широкое применение находят так называемые мостовые схемы. На рис. 198 изображена однофазная мостовая схема.

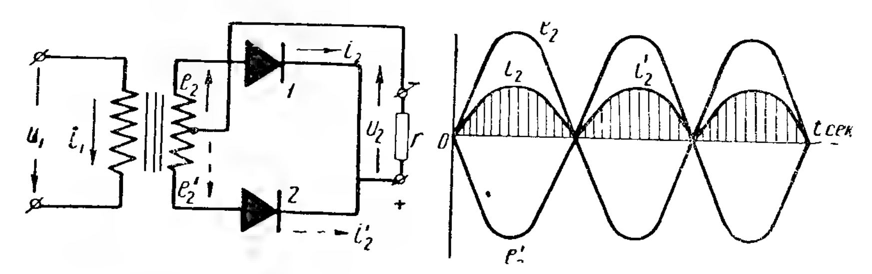



Рис. 197. Двухполупериодное выпрямление

На этой схеме ток в течение одного полупериода проходит через одну пару вентилей, а во время второго полупериода — через другую пару вентилей. Во время первого полупериода ток проходит по пути: вторичная обмотка трансформатора (точка *1*) — точка *а* мостовой схемы — вентиль — точка *б* — потребитель *г* — точка *в* мостовой схемы — вентиль — точка *г* мостовой схемы — вторичная обмотка трансформатора (точка *2*).

Во время второго полупериода ток проходит по пути: вторичная обмотка трансформатора (точка 2) — точка *г* мостовой схемы — вентиль — точка *б* мостовой схемы — потребитель *r* — точка *в* мостовой схемы — вентиль — точка *а* мостовой схемы — вторичная обмотка трансформатора (точка *1*).

В каждую ветвь мостовой схемы могут включаться параллельно или последовательно несколько вентильных столбиков, в зависимости от величины напряжения питающей сети и тока нагрузки.

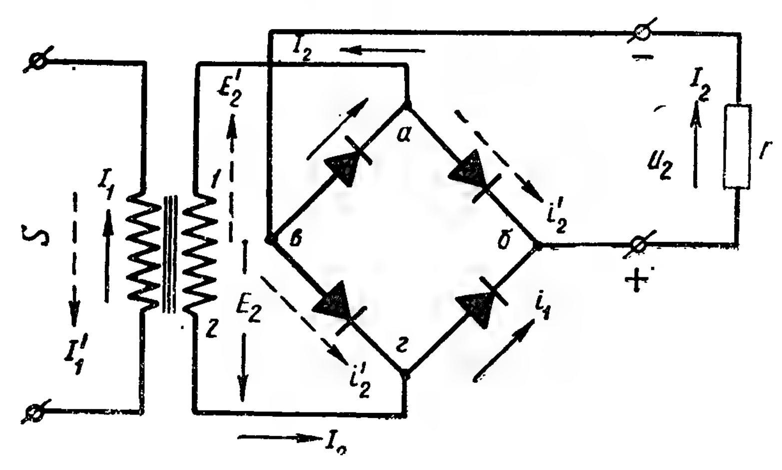



Рис. 198. Однофазная мостовая схема

Среднее значение выпрямленного напряжения одно и то же как для двухполупериодной схемы, так и для однофазной мостовой схемы. Применяя формулу для среднего значения любой синусоидальной величины, можно получить

$$U_{cp}=\frac{E_{2макс}}{\pi}\int_0^\pi \sin\alpha d\alpha=\frac{\sqrt{2}E_2}{\pi}\int_0^\pi \sin\alpha d\alpha=\frac{2\sqrt{2}}{\pi}E_2=0,9E_2,$$

где $E_2$ — действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Преимущество второй схемы по сравнению с первой заключается в том, что ее можно включать в сеть без промежуточного трансформатора, и обратное напряжение в ней оказывается в два раза меньше. Под обратным напряжением следует понимать напряжение на запертом вентиле.

Основным типом полупроводниковых выпрямителей сейчас являются селеновые выпрямители. Однако значительно эффективнее выпрямители, основанные на использовании германия и кремния.

Германий — элемент IV группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева, порядковый номер 32, атомный вес 72,60. Он представляет собой твердый хрупкий металл серо-белого цвета с температурой плавления $t_{пл}$=958°.

Выпрямительный элемент состоит из диска чистого монокристаллического германия электронной проводимости, к которому с одной стороны приплавлен индий, а с другой — олово.

Направление тока в элементе — от индия в сторону олова. Обратное направление — запирающее.

Ценным свойством германиевого выпрямителя является возможность получения больших плотностей тока, в сотни раз превышающей плотность тока селеновых выпрямителей. Недостаток этого элемента состоит в том, что он устойчиво работает при температуре нагрева не выше 75° и что его обратное напряжение невелико.

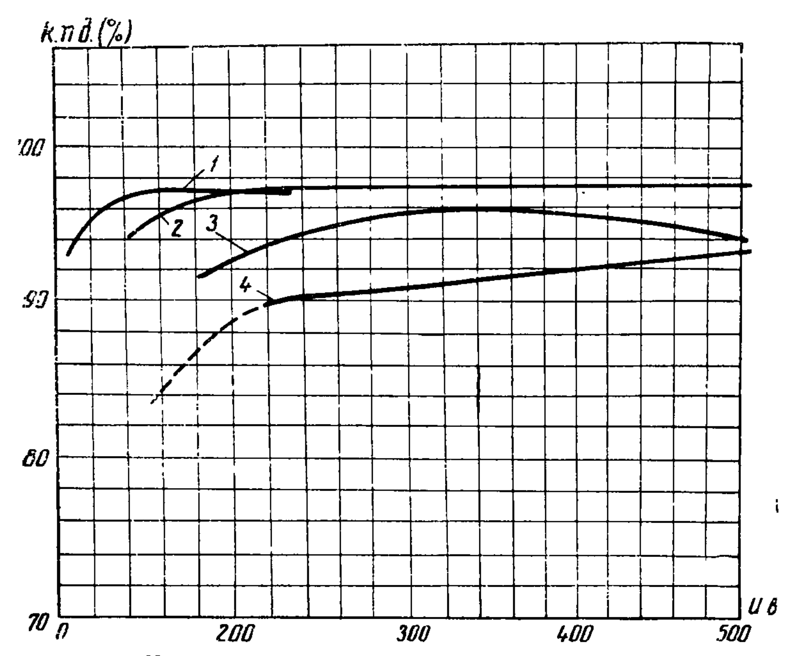



**Рис. 199. Кривые к.п.д. в зависимости от напряжения на выходе:**
*1*—германиевый выпрямитель; *2*—контактный преобразователь; *3*—двигатель-генератор; *4*—ртутный выпрямитель

Силовые германиевые элементы выполняются на токи 10—50 *а* с воздушным охлаждением и на 200 *а* с водяным охлаждением на напряжение 24, 48, 50 *в*. Так же как и селеновые выпрямители, они могут соединяться в параллельные группы для получения большого тока и последовательные — для более высоких напряжений.

Кремний — после кислорода наиболее распространенный химический элемент, однако получить его в сверхчистом виде очень сложно. Кремниевый элемент состоит из монокристаллической пластинки кремния толщиной 0,5—0,8 *мм*. Площадь пластинки определяется в зависимости от плотности тока из расчета 0,5—1,0 *а* на 1 *мм*$^2$ площади.

С одной стороны на пластинку кремния наплавляется алюминий, а с другой — свинец.

Кремниевый выпрямительный элемент обладает электронно-дырчатой проводимостью. Направление тока в элементе — от алюминия в сторону свинца.

Эти элементы достаточно термостойки и работают в диапазоне температур от +150° до —60°.

На рис. 199 приведены кривые к. п. д. различных типов полупроводниковых выпрямителей.

Полупроводниковые выпрямители широко применяются в установках связи и радиотехнике, в цепях автоматического управления электрическими приводами, в измерительных лабораториях. Силовые полупроводниковые выпрямители используются в зарядных устройствах, сварочных агрегатах и для электроосмических процессов, там, где потребляется постоянный ток в десятки тысяч ампер при напряжениях от 5 до 50 *в*. Полупроводниковые выпрямители с успехом применяются в схемах возбуждения синхронных генераторов. Они позволяют упростить конструкцию машин, снизить вес и габариты агрегатов и получить автоматическую безинерционную регулировку напряжения. Синхронные двигатели с полупроводниковыми выпрямителями имеют большую устойчивость при изменении нагрузки и повышают коэффициент мощности установок.

В настоящее время Всесоюзный Электротехнический институт (ВЭИ) совместно с заводом «Электросила» разрабатывает полупроводниковый выпрямитель на 1500 *а*, 100 *в* для турбогенератора мощностью 30 тыс. *квт*.

---

## *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. Какие применяются типы преобразователей?
2. Как устроены и работают двигатель-генераторы?
3. Как определяется к.п.д. двигатель-генераторов?
4. Как устроены одноякорные преобразователи?
5. Чему равна э. д. с. и величина тока со стороны трехфазного переменного тока у одноякорного преобразователя?
6. Каковы рабочие характеристики одноякорного преобразователя?
7. Как устроен и работает газотрон?
8. В чем отличие тиратрона от газотрона?
9. Каково назначение сетки у тиратрона?
10. Каковы достоинства и недостатки тиратрона?
11. Как устроен ртутный выпрямитель, каково назначение его электродов?
12. Как протекает рабочий процесс ртутного выпрямителя и что характеризует его вольтамперная характеристика?
13. Каковы достоинства и недостатки ртутных выпрямителей?
14. Как устроены и работают полупроводниковые выпрямители?
15. Из каких частей состоит медно-закисный и селеновый выпрямительные элементы?
16. Каковы электрические характеристики медно-закисных и селеновых выпрямителей?
17. Как работает двухполупериодная мостовая схема с полупроводниковыми выпрямителями?

---

## ЛИТЕРАТУРА


Алексеев А. Е., Конструкция электрических машин, Госэнергоиздат, 1949.

Бергер А. Я., Синхронные машины, изд. 2-е, ГОНТИ, 1938.

Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А., Сергеев П. С., Проектирование электрических машин, Госэнергоиздат, изд. 2-е, 1950.

Иванов В. И., Синхронные машины. ВЭТА — КУБУЧ, 1934.

Каганов И. Л., Электронные и ионные преобразователи, ч. I, Госэнергоиздат, 1950.

Каганов И. А., Электронные и ионные преобразователи, ч. II, Госэнергоиздат, 1955.

Костенко М. П., Электрические машины, ч. I, Госэнергоиздат, 1944.

Костенко М. П., Электрические машины, Специальная часть. Госэнергоиздат, 1946.

Круг К. А., Основы электротехники, изд. 4-е, ОНТИ, 1936.

Матвеев Е. Н., Судовая электротехника, изд. 5-е, Мориздат, 1952.

Мещеряков В. В. и Ченцов И. М., Пересчет электрических машин и таблицы обмоточных данных, Госэнергоиздат, 1950.

Московский М. И., Технология электромашиностроения, Госэнергоиздат, 1947.

Николаев С. А., Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам, Госэнергоиздат, 1953.

Основы электротехники, Госэнергоиздат, 1952, под ред. К. А. Круга.

Петров Г. Н. и др., Электрические машины, ч. 1-я, Госэнергоиздат, 1940.

Петров Г. Н., Электрические машины, ч. 2-я, Госэнергоиздат, 1947.

Поляков Н. А., Электрические машины, Машгиз, 1953.

Постников И. М., Проектирование электрических машин, Гостехиздат УССР, 1952.

Пиотровский Л. М., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1956.

Пиотровский Л. М. и Попов В. К., Испытание машин переменного тока, ОНТИ, 1937.

Речной Регистр СССР, Правила по электрооборудованию судов внутреннего плавания (реки, озера, каналы), Речиздат, 1953.

Толвинский В. А., Электрические машины постоянного тока изд. 3-е, Госэнергоиздат, 1956.

Чиликин М. Г., Общий курс электропривода, Госэнергоиздат, 1951.

Шенфер К. И., Асинхронные машины, изд. 4-е, ГОНТИ, 1938.

Шенфер К. И., Динамомашины и двигатели постоянного тока ОНТИ, 1937

# СОДЕРЖАНИЕ

*Раздел второй*

## МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

## ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

| Стр. | Строка | Напечатано | Следует читать | По вине |
|---|---|---|---|---|
| 45 | 16 снизу | ток обмотки якоря, | ток якоря, | автора |
| 47 | Табл. 2, 2-я стр. снизу | N-s-S-N-N-s-S-N | N-s-S-N-N-s-S-N | типографии |
| 58 | 11 сверху | $l=l_a-n_3b_3-\dots$ | $l=l_a-n_s b_s-\dots$ | автора |
| 60 | Ф. (68) | $\dots=2H_m l_n$, | $\dots=2H_m l_m$, | „ |
| 70 | 24 снизу | ...—S—N,...N—N... | ...S—N,...N—N... | типографии |
| 101 | 11 сверху | $M=k_м\Phi_a$ | $M=k_м\Phi I_a$ | „ |
| 124 | 16 „ | $f=\frac{fn}{60}-$ | $f=\frac{pn}{60}-$ | автора |
| 132 | 15 „ | На рис. 93 | На рис. 92 | „ |
| 132 | 12 снизу | $r_1-r_{14}-$ | $r_1-r_{11}-$ | корректора |
| 132 | Подрисуночная подпись рис. 93 | реостата 3-й величины | реостата типа РЗП-2 | автора |
| 171 | 16 снизу | плотно использовать | полно использовать | корректора |
| 181 | 3 „ | ток $I$, $\cos\varphi$ $(\varphi>0)$ | ток $I\cos\varphi$ $(\varphi>0)$ | автора |
| 188 | Ф. (132) | $E_1=w\dots$ | $E_1=\dots$ | типографии |
| 190 | Подрисуночная подпись рис. 135 | ... *5*—обмотки трансформатора; *6*—термометр; *7*—катки | ... *7*—обмотки трансформатора; *5*—термометр; *6*—катки | автора |
| 204 | 3 снизу | $(b_a=\dots$ | $(ba=\dots$ | типографии |
| 204 | 5 „ | $(cv=\dots$ | $(cb=\dots$ | „ |
| 205 | 10 „ | $fd=ve=u_{kS}$ | $fd=be=u_{ks}$ | „ |
| 211 | 16 сверху | отключение | отклонение | корректора |

Заказ 1812

Автор
*НЕЧАЕВ ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬЕВИЧ*

Редактор издательства *Шленникова З. В.*
Техн. ред. *Красная А. К.*
Корректоры *Озерова А. П.* и *Сидор В. В.*

**Сдано в производство** 26/VIII 1957 г. **Подписано к печати** 14/XII 1957 г.
Т-11048 **Бумага** 60×92$^1/_{16}$—9 б. л.=18 п. л. 19,01 уч.-изд. л.
**Тираж** 20500 (1—3000). **Изд. №** Ут-302-Р. **Зак.** 1218

**1-я тип. изд-ва „Речной транспорт". Москва, Кожевническая ул., д. 1-б**

Цена 7 р. 65 к.

